

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.372

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ *153 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)

на тему: Волоконно-оптична лінія зв'язку із застосуванням технології
спектрального ущільнення каналів в сегменті мережі УРАН в місті Полтава

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ДП-61м
(шифр групи)

Веремеснко Олександр Станіславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., канд. техн. наук М. Р. Домбругов
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент директор Асоціації УРАН, с.н.с., к.т.н. В. Г. Галаган

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить основну частину на 78 сторінках, 5 розділів, 32 ілюстрації, 29 таблиць і 17 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є топологія волоконно-оптичної мережі «УРАН» в м. Полтава.

Предметом дослідження є грубе спектральне ущільнення оптичних каналів на різних несучих довжинах хвилі.

Метою роботи є розробка модернізованої топології волоконно-оптичної лінії зв'язку в сегменті «УРАН» в м. Полтава із застосуванням технології грубого спектрального ущільнення каналів.

Розроблено топологію волоконно-оптичної мережі із застосуванням технології CWDM. Нова лінія зв'язку забезпечує підведення до кожного абоненту щонайменше по два канали CWDM, до 10 Гбіт/с кожний. Мережа розгорнута паралельно існуючій одножильній оптичній лінії передачі, що дає можливість плавного переходу та підключення клієнтів. Додатково був розроблений стартап проект впровадження технології грубого спектрального ущільнення у місті, проведений огляд потенційних конкурентів та аналіз ризиків і можливостей.

Ключові слова: ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, СПЕКТРАЛЬНЕ УЩІЛЬНЕННЯ, МУЛЬТИПЛЕКСОР, ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОР, ТРАНСИВЕР, КОМУТАТОР, ДОВЖИНА ХВИЛІ, ТОПОЛОГІЯ.

ABSTRACT

Thesis contains the main part of 78 pages, 5 chapters, 32 illustrations, 29 tables and 17 links in the list of source references.

Object is the topology of the optical network "URAN" in the city of Poltava.

The subject of the study is coarse wavelength-division multiplexing technology.

The aim of study is to modernize the URAN optical network topology in Poltava using coarse wavelength-division multiplexing technology.

The topology of fiber-optic network with the use of CWDM technology was developed. The new communication line provides access to at least two CWDM channels for each subscriber, up to 10 Gbit/s each. The network is deployed in parallel with the existing bidirectional optical transmission line, which provides a gradual upgrade process and customer connection. In addition, a start-up project for the implementation of coarse wavelength-division technology in the metropolitan area was developed, with an overview of potential competitors, risk and opportunities analysis.

Key words: FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE, WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING, MULTIPLEXER, DEMULTIPLEXER, TRANSCEIVER, SWITCH, TOPOLOGY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ.....	9
1.1. Галузі застосування і класифікація волоконно-оптичних кабелів.	10
1.2. Переваги ВОЛЗ.	11
1.3. Недоліки ВОЛЗ.	13
1.4. Сфери застосування ВОЛЗ.	14
1.5. Оптичне волокно – історія та етапи розвитку.	15
1.5.1. Етапи розвитку ВОЛЗ	15
2. ТЕХНОЛОГІЯ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ.	20
2.1. Умови використання систем CWDM.....	22
2.2. Обладнання CWDM.....	24
2.2.1. SFP модулі.....	26
2.2.2. Оптичні мультиплексори.....	28
2.2.3. Будова мультиплексорів/демультиплексорів.	29
2.2.4. Традиційна схема мультиплексора CWDM.....	32
2.2.5. Мультиплексор CWDM зі зменшеним внесеним загасанням	33
2.2.6. OADM рішення.....	35
2.3. Типи топологічних рішень.....	36
2.3.1. Топологія «Точка — Точка».	36
2.3.2. Топологія «З'єднання з відгалуженням».	37
2.4. Переваги системи з грубим спектральним мультиплексуванням.	37
2.5. Рівень доступу.....	38
3. «УРАН» — УКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ОСВІТНЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА.	43
3.1. Історія розвитку мережі.	43
3.2. Технічні характеристики.....	44
3.3. Сегмент мережі УРАН у місті Полтава.....	46

4. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ CWDM У М. ПОЛТАВА.	48
4.1. Аналіз наявної топології мережі та обґрунтування розробки модернізації з використанням CWDM.	48
4.2. Обладнання для реалізації CWDM лінії зв'язку.	51
4.2.1. Двохволоконний оптичний мультиплексор/демультиплексор.	52
4.2.2. SFP+ трансивери.	54
4.2.3. Вузлові комутатори.	56
4.2.4. Рекомендовані комутатори рівня доступу.	58
4.3. Розробка топології мережі «УРАН» у м. Полтава із застосуванням CWDM.	60
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ОСНОВІ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ	66
5.1. Опис ідеї проекту.	66
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.	68
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.	68
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.	72
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.	74
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

CWDM – coarse wavelength-division technology.

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку.

СКС – структурована кабельна система.

ВОК – волоконно-оптичний кабель.

SDH – synchronous digital hierarchy.

ОП – оптичні підсилювачі.

SFP – small form-factor pluggable.

OADM – optical add-drop multiplexer.

MUX – multiplexer.

DEMUX – demultiplexer.

STP – spanning tree protocol.

ВСТУП

Технологія мультиплексування спектрального розподілу хвиль, що виникла у 1980-х роках, спочатку знайшла своє застосування у магістральних сполученнях, але з 1990-х років широко використовувалася в столичних та регіональних мережах. Розвиток волоконної оптики та волоконно-оптичних систем передачі, включаючи технологію спектрального ущільнення, незважаючи на досягнуті успіхи, все ще знаходиться в середині його шляху.

З часом, розвиток інформаційних технологій збільшив обсяги та кількість даних, що передаються по мережі. Постало питання нестачі пропускної здатності в міських та регіональних масштабах. У випадку міських мереж, вартість обладнання є важливою складовою. Впливаючи з цього, як одне з рішень проблеми, для них цікавою та перспективною технологією стало "нещільне" мультиплексування – грубе ущільнення за довжинами хвиль (CWDM).

Розвиток подібних систем став можливим завдяки вдосконаленню технології оптичного волокна, що дозволило збільшити його смугу пропускання на порядок: від 30 до 340 нм. Затухання в смузі пропускання змінювалося поступово в порівняно невеликому діапазоні, що в свою чергу, збільшує крок між несучими довжинами хвилі, щонайменше в 10 разів, і тим самим значно спрощує їх фільтрацію на стороні отримувача, зменшуючи вартість обладнання. З'явився новий клас рішень. Спектральне ущільнення дозволяє дуплексу передачу протоколів різних типів через оптичне волокно. Технологія використовується для більш ефективного застосування існуючої волоконно-оптичної інфраструктури та збільшення пропускної здатності оптичного волокна. Її використання може зменшити вартість встановлення нового оптичного кабелю, або покращити ефективність вже прокладеного.

1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ.

Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) - це вид системи передачі, в якій інформація передається по діелектричних оптичних хвилеводах - "оптичне волокно". Це інформаційна мережа, сполучними елементами між вузлами якої є оптичні лінії передачі.

Технології ВОЛЗ охоплюють питання, які стосуються електронного передавального обладнання, його стандартизації, протоколів передачі, топології мережі та їх побудови.

В основному ВОЛЗ використовуються при побудові об'єктів, в яких монтаж структурованої кабельної системи (СКС) повинен об'єднати багатоповерховий будинок, або в будівлі великої протяжності, а також при об'єднанні територіально-розрізнених об'єктів. [1]

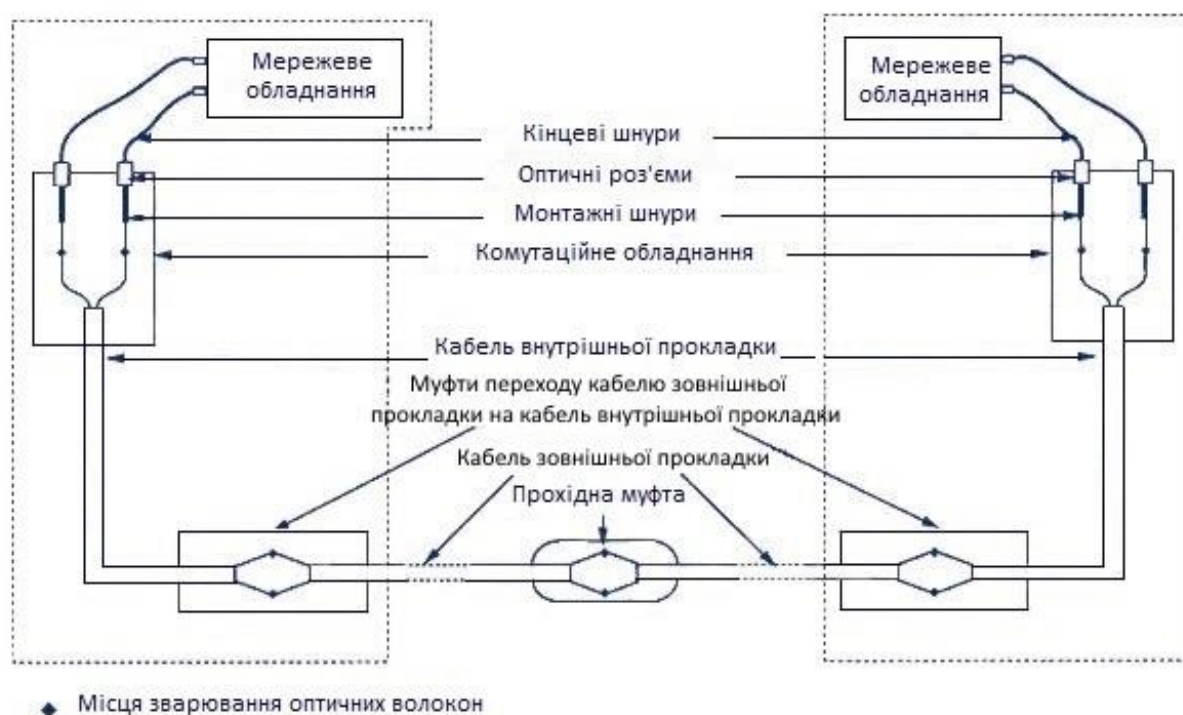


Рис. 1.1. Структурна схема ВОЛЗ, яка застосовується для створення підсистеми зовнішніх магістралей [1].

1.1. Галузі застосування і класифікація волоконно-оптичних кабелів.

Волоконно-оптичні кабелі, що застосовуються при проектуванні і монтажі СКС, призначені для передачі оптичних сигналів в будівлях і між ними.

За видом застосування, волоконно-оптичні кабелі поділяються:

- кабелі зовнішньої прокладки (outdoor cables);
- кабелі внутрішньої прокладки (indoor cables);
- кабелі для шнурів.

Кабелі зовнішньої прокладки використовуються при створенні підсистеми зовнішніх магістралей і пов'язують між собою окремі будівлі. Основна галузь застосування кабелів внутрішньої прокладки, це організація внутрішньої магістралі будівлі, кабелі для шнурів призначені для виготовлення сполучних і комутаційних шнурів, також для горизонтальної розводки при реалізації проектів «fiber to the desk» (волокно до робочого місця) та «fiber to the room» (волокно до кімнати) [1].



Рис. 1.2. Загальна класифікація оптичних кабелів СКС.

1.2. Переваги ВОЛЗ.

Волоконно-оптичні лінії володіють переліком переваг перед дротяними (мідними) і радіорелейними системами зв'язку:

1) широка смуга пропускання пов'язана з надзвичайно високою несучою частотою 1014 Гц. Це дає потенціал для єдиного оптичного волокна для передачі інформації в декількох терабітах за секунду. Це одна з найважливіших переваг оптичного волокна над міддю або будь-яким іншим носієм передачі інформації.

2) низьке ослаблення світлового сигналу у волокні. В даний час промислові оптичні волокна, вітчизняних та закордонних виробників, мають загасання 0,2-0,3 дБ на довжині хвилі 1550 нм на кілометр. Мале затухання і мала дисперсія дозволяють будувати секції ліній без ретрансляції довжиною до 100 км і більше.

3) низький рівень шуму у волоконно-оптичному кабелі дозволяє збільшити пропускну здатність, передаючи різну модуляцію сигналів з низькою швидкістю кодування.

4) високий шумовий імунітет. Оскільки волокно виготовляється з діелектричного матеріалу, воно несприятливо до електромагнітних перешкод від оточуючих мідних кабельних систем та електричного обладнання, що здатне викликати електромагнітне випромінювання (лінії електропередачі, електродвигуни тощо).

5) легка вага та об'єм. ВОК мають менше ваги та об'єму в порівнянні з мідними кабелями з точки зору однакової пропускну здатності. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см можна замінити одним волокном діаметром 0,1 см. Якщо волокно "одягнене" в різні захисні оболонки та покрито сталевією стрічковою бронею, діаметр такого ВОК становитиме 1,5 см, що в кілька разів менше, ніж телефонний кабель.

6) висока безпека від несанкціонованого доступу. Оскільки ВОК практично не випромінюють в радіодіапазоні, передану по ним інформацію важко підслухувати, не порушуючи прийом-передачу. Системи контролю (безперервний

контроль) цілісності оптичної лінії зв'язку, що використовують властивості високої чутливості до волокна, можуть миттєво відключати "зламаний" канал зв'язку і подавати відповідний сигнал попередження. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти поширюваних світлових сигналів, мають дуже високу чутливість до коливань та до малих падінь тиску. Такі системи необхідні для створення ліній зв'язку у державних, банківських та деяких інших спецслужбах, які встановлюють підвищені вимоги до захисту даних.

7) гальванічна ізоляція елементів мережі. Ця перевага оптичного волокна полягає в його ізоляційній властивості. Волокно допомагає уникнути електричних "заземлювальних циклів", які можуть виникнути, коли два мережеві пристрої нерозділеної комп'ютерної мережі, з'єднані мідним кабелем, заземлюються в різних точках будівлі, наприклад, на різних поверхах. У цьому випадку може мати місце велика різниця потенціалів, що може пошкодити обладнання. Для волокна ця проблема просто не існує.

8) вибух та пожежна безпека. Через відсутність іскроутворення, оптичне волокно підвищує безпеку мережі на хімічних, нафтопереробних заводах та у підтримці технологічних процесів високого ризику.

9) економічне питання. Волокно виготовляється з кварцу, основою якого є кремнезем, широко поширений і, отже, недорогий матеріал, на відміну від міді. В даний час вартість волокна відносно мідної пари відноситься як 2:5. У цьому випадку ВОК дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані без ретрансляції, що робить його більш ефективним на довгих дистанціях. Число ретрансляторів на довгих лініях скорочується. Використовуючи солітонні системи передачі, відстані у 4000 км були досягнуті без регенерації (використовуючи тільки оптичні підсилювачі в проміжних вузлах) при швидкості передачі понад 10 Гбіт/с.

10) тривалий термін служби. З часом волокна відчувають деградацію. Це означає, що ослаблення в м'якому кабелі поступово збільшується. Однак, завдяки вдосконаленню сучасних технологій виробництва оптичного волокна, цей процес значно сповільниться, а термін служби становитиме приблизно 25 років. За цей час

декілька поколінь/стандартів приймально-передавальних систем можуть бути змінені [2].

11) віддалений блок живлення. У деяких випадках потрібен віддалений блок живлення вузла інформаційної мережі. Оптичне волокно не здатне виконувати функції кабелю живлення. Проте в цих випадках можна використовувати змішаний кабель, коли поряд з оптичними волокнами проходить кабель обладнаний мідним провідником.

1.3. Недоліки ВОЛЗ.

Звичайно будь-яка система має свої недоліки, хоча в нашому випадку їх кількість значно менша за перелічені вище переваги:

- 1) відносна крихкість оптичного волокна. При сильному вигинанні кабелю (особливо, коли в якості силового елемента використовується склопластиковий пруток) можлива поломка волокон або їх замутнення через виникнення мікротріщин.
- 2) складність з'єднання у випадку розриву.
- 3) складна технологія виготовлення як самого волокна, так і компонентів ВОЛЗ.
- 4) складність перетворення сигналу (в інтерфейсному устаткуванні) [2].
- 5) відносно висока вартість кінцевого рішення ВОЛЗ. Проте, устаткування є дорогим у абсолютних цифрах. Співвідношення ціни і пропускної спроможності для ВОЛЗ краще, ніж для інших систем.
- 6) втрата прозорості волокна з часом, внаслідок старіння [3].

1.4. Сфери застосування ВОЛЗ.

Основною сферою застосування ВОЛЗ є мережі передачі інформаційних сигналів (обчислювальні мережі, відеоспостереження, телекомунікаційні системи контролю доступу та ін.). При цьому на рівні магістральних (аж до міжконтинентальних) ліній передачі сигналів, оптичне волокно займає вже зараз домінуюче становище, тоді як в підсистемах внутрішніх магістралей ВОЛЗ використовується поряд з витою парою.

Таблиця 1.1. Характеристика типу оптичного волокна. [2]

Параметри		Од. вим.	Тип оптичного волокна							
			Е	С	Н	А	В	Г	М	К
Робоча довжина хвилі		нм	1310, 1550	1560	1530- 1620	1310-1550	1460- 1625	1300	1300	1550
Коефіцієнт загасання (для кабелів з гелевим заповненням модулів)	1300 нм	ДБ/км	-	-	-	-	-	≤ 0.7	≤ 0.7	-
	1310 нм		≤ 0,36	-	-	-	-	-	-	-
	1550 нм		≤ 0,22	≤ 0,22	≤ 0,22	-	0,25	-	-	-
	1460 нм		-	-	-	-	0,35	-	-	-
	в діапазоні робочих довжин хвиль		-	-	≤ 0,22- 0,25	≤ 0,25- 0,40	0,22 0,35	-	-	-
Коефіцієнт загасання (для кабелів з волокнами в щільному буферном покритті)	1300 нм	ДБ/км	-	-	-	-	-	≤ 1,3	≤ 1,3	-
	1310 нм		≤ 0,5	-	-	-	-	-	-	-
	1550 нм		≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,4	-	-			≤ 0,4
	в діапазоні робочих довжин хвиль		-	-	≤ 0,4- 0,5	≤ 0,4-0,5	-	-	-	-
Довжина хвилі відсічення в кабелі		нм	≤ 1260	≤ 1250	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1450	-	-	-
Довжина хвилі нульової дисперсії		нм	1310±10	1555±15	-	1310±10	1422±17	-	-	

1.5. Оптичне волокно – історія та етапи розвитку.

У 1842 році швейцарський фізик і винахідник Жан-Даніель Колладон продемонстрував в Женевській Академії цікаве дослідження. Суть його полягала в можливості проходження світла по непрякій лінії за принципом повного внутрішнього відображення. Дослідження було показане на прикладі водяного струменя, освітленого сонячним світлом, і отримало назву «фонтан Колладона» або «світловий фонтан». Цей винахід, незабаром, було застосовано на практиці: в столицях Європи з'явилися унікальні фонтани, що світяться різними кольорами.

Майже через століття (в 1934 р) американець Норман Р. Френч запатентував оригінальний винахід: оптичну систему для телефонного зв'язку. Передбачалося, що словесні сигнали будуть передаватися по системі скляних кабелів за допомогою світлових променів. Перші зразки скловолокна виготовив Ларі Картіс - звичайний студент Мічиганського університету. Він створив досліdну конструкцію, що складається зі скляного стрижня поміщеного в оболонку і витягнутого в найтонше волокно.

Справжній прорив у розвитку науки волоконно-оптичного зв'язку стався завдяки винаходу лазера в 1958 році американськими вченими Шавлова і Таунс, і одночасно радянськими фізиками Прохоровим і Басовим. Джерело світла для оптичних систем було знайдено. Трохи пізніше були створені напівпровідникові лазерні і світлодіодні випромінювачі, винайдені фотодіоди [3].

1.5.1. Етапи розвитку ВОЛЗ

Велика частина проблем і одночасно основні досягнення та можливості ВОЛЗ пов'язані з двома елементами систем: волоконними світловодами і лазерами. У

розвитку оптичних систем розробники прагнули реалізувати два принципи: "швидше" і "далі".

1 етап. В середині 70-х років ХХ століття з'явилися напівпровідникові лазери і волоконні світловоди з невеликим загасанням. Перші лазери для ВОЛЗ мали довжину хвилі випромінювання 850 нм (перше вікно прозорості волокна) і невисоку ефективність; волоконні світловоди були багатомодовими і мали загасання в кілька дБ/км. Тому ВОЛЗ хоча і показали переваги перед системами на мідних проводах, але мали швидкості і відстані передачі далекими від очікуваних. Збільшенню швидкості передачі в перших ВОЛЗ заважала тимчасова дисперсія проходження оптичного сигналу по волоконному тракту.

Перші волоконні світловоди (багатомодові із ступінчастим профілем показника заломлення) через велику міжмодову дисперсію мали смугу пропускання не більше 20 МГц/км. Ця проблема була досить швидко вирішена розробкою багатомодових волоконних світловодів з градієнтним профілем показника заломлення, які забезпечили збільшення смуги пропускання до 160 МГц/км [4].

2 етап. Збільшення дальності передачі інформації. Для цього було необхідно знизити величину загасання оптичного сигналу в волоконному тракті. Розробка приймально-передавальної апаратури, що працює в другому (1300 нм) спектральному діапазоні (вікні), дозволила знизити загасання в багатомодових волокнах з 3 дБ/км (850 нм) до 1 дБ/км (1300 нм). Одночасно у багатомодових волокон підвищилася і смуга пропускання до 500 МГц/км.

3 етап. Одномодові волокна дозволили значно підвищити швидкість передачі інформації за рахунок відсутності міжмодової дисперсії, а перехід до третього спектрального вікна (1550 нм) дозволив знизити втрати в одномодових волокнах з 0,35 дБ/км (1310 нм) до 0,2 дБ/км (1550 нм).

Відкриті можливості по нарощуванню швидкості і дальності передачі інформації привели до значного прогресу цифрових систем передачі інформації (мережі синхронної цифрової ієрархії - SDH). Потреба в розвитку таких систем була дуже високою, так як обсяг трафіку, що передається безперервно збільшувався, і це стимулювало роботи щодо подальшого вдосконалення ВОЛЗ. Було показано, що

збільшення швидкості і дальності передачі інформації в одномодових системах перешкоджає хроматична дисперсія в волокнах. Ця проблема була успішно вирішена при розробці оптичних волокон з нульовою дисперсією в області довжин хвиль 1310 нм (волокна типу G.652) і зміщеною в області довжин хвиль 1550 нм нульовою дисперсією (волокна типу G.653). Для збільшення дальності передачі інформації стали використовуватися регенератори сигналу, які перетворювали оптичний сигнал в електричний, відновлювали його форму, а потім формували оптичний сигнал для подальшого проходження по волоконному тракту.

4 етап. Використання оптичних підсилювачів (ОП), які дозволили ефективно збільшити дальність передачі. ВОЛЗ з оптичними підсилювачами і волокном G.653 забезпечували передачу інформації зі швидкостями до 40 Гбіт/с на відстань понад сто кілометрів.

Розроблені ОП відкрили найважливіший етап в розвитку волоконно-оптичного зв'язку – з'явилися системи зі спектральним ущільненням. У них використовується така властивість волоконних систем, як можливість незалежної передачі інформації на різних довжинах хвиль, в різних каналах. Перші ВОЛЗ зі спектральним ущільненням працювали в різних спектральних вікнах (1310 нм і 1550 нм). Але системи зі спектральним ущільненням найбільш ефективні в третьому спектральному вікні (1550 нм), так як в цьому випадку один ОП посилює всі інформаційні канали, розташовані у вікні [4].

Реалізація унікальних можливостей таких систем (щільного спектрального мультиплексування – DWDM і надщільного спектрального мультиплексування – HDWDM), в свою чергу, зажадала рішення ще одного ряду фундаментальних завдань.

Найбільш ефективний шлях побудови ВОЛЗ зі спектральним ущільненням – збільшення числа каналів. При збільшенні дальності передачі, доводиться посилювати оптичні сигнали в кожному каналі, і при великій сумарній потужності, у волокні починають проявлятися нелінійні ефекти. Для DWDM-систем найбільш істотним є ефект чотирьоххвильового зміщення, коли в спектрі сигналу з'являються небажані компоненти, перехресні перешкоди. При спектральному способі дешифрування оптичних сигналів, це може привести до значних помилок в передачі

інформації. Чотирьоххвильове зміщення найбільш сильно позначається в разі рівності швидкостей поширення оптичних сигналів в каналах. З цієї причини оптичні волокна зі зміщеною нульовою дисперсією (G.653) не використовуються в DWDM-системах, а для зменшення впливу чотирьоххвильового зміщення були розроблені волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією (G.655) і технологія компенсації хроматичної дисперсії.

Крім спеціальних оптичних волокон для DWDM-систем були розроблені високостабільні лазери з вузькою спектральною лінією, а також спектральні мультиплексори/демультиплексори. Цей цикл робіт зажадав значного поступу у фізиці, технології лазерів і інтегрально-оптичних схем.

Подальший розвиток ВОЛЗ відбувався по шляху збільшення числа порівняно "низькошвидкісних" (декілька Гбіт/с) каналів в DWDM- і HDWDM-системах, так і по шляху подальшого збільшення швидкості передачі інформації в оптичному каналі. В даний час серійно випускаються системи зі швидкістю передачі 40 Гбіт/с, ведуться експерименти на 100 Гбіт/с. Однак вже на швидкостях понад 10 Гбіт/с з'являються обмеження, пов'язані ще з одним видом тимчасової дисперсії – поляризаційно-модовою дисперсією (PMD). Вирішення цієї проблеми вимагає проведення фундаментальних досліджень і значного просування в області технології виготовлення волоконних світловодів і оптичних кабелів, монтажу лінії і контролю параметрів тракту.

5 етап. Масові локальні волоконно-оптичні системи передачі повинні забезпечити завантаженість регіональних і магістральних ВОЛЗ, підвищити ефективність волоконно-оптичних мереж зв'язку. При цьому доцільно використовувати багатомодові волоконні світловоди. Поява нових високоефективних лазерів для локальних мереж, дозволяє значно підвищити швидкість і дальність передачі інформації в ВОЛЗ на основі багатомодових волокон. Однак при цьому з'являється проблема "центрального провалу" в багатомодових волокнах, пов'язана з недосконалістю технології виготовлення заготовок для цих світловодів. Значні відхилення профілю показника заломлення від оптимального в центрі волокна, викликали різке збільшення дисперсії в разі використання сучасних лазерів. Ця

проблема багатомодового волокна була вирішена, що відкрило нові можливості в розвитку локальних ВОЛЗ і волоконно-оптичних систем в цілому.

Рішення фундаментальних проблем було підкріплено розвитком супутніх технологій, які і забезпечили просування ВОЛЗ до споживачів шляхом "швидше-далі". Найбільш істотні успіхи спостерігалися в технології виробництва волоконних світловодів та кабелів. При цьому, зростання виробництва оптичних волокон безпрецедентне: з 6,9 млн. км у 1990 році до 76,6 млн. км в 2000 р – в 11 разів. Сучасні технології монтажу і вимірювання параметрів волоконного тракту, повністю відповідають високому рівню сучасних ВОЛЗ. Досить сказати, що зварювальні апарати, забезпечують ефективний монтаж волоконного тракту з втратами в місці зварювання – менше 0,02 дБ. Завдяки цьому, а також розвитку високих технологій виробництва оптичних передавачів та приймачів, мережевих технологій та методів спектрального ущільнення, забезпечені високі темпи розвитку ВОЛЗ [4].

2. ТЕХНОЛОГІЯ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ.

Грубе спектральне ущільнення (англ. coarse wavelength-division multiplexing, CWDM) засноване на методі використання оптичних каналів, відокремлених один від одного на відстані 20 нм. Принцип методу в тому, що кожен інформаційний потік передається одним оптичним волокном на різних довжинах хвиль (несучих частотах). За допомогою спеціалізованих пристроїв – оптичних мультиплексорів, потоки об'єднуються в один оптичний сигнал, який входить в оптичне волокно. На приймаючій стороні відбувається зворотна операція – демультимплексування, що, відповідно, здійснюється за допомогою оптичних демультимплексорів. Це відкриває невичерпні можливості, як для збільшення пропускної здатності лінії, так і для побудови складних топологічних рішень за допомогою однієї волоконної жили.

Головні характеристики на які необхідно звернути увагу:

- 1) діапазон оптичних каналів знаходиться в межах від 1270 до 1610 нм, де кількість можливих каналів – до 18.
- 2) слід звертати увагу на тип волокна, що використовується. Для того, щоб коректно підібрати кількість каналів. Наприклад, у волокні типу G.652b (волокна з водяним піком на довжині хвилі 1383 нм), у другому вікні прозорості збільшуються втрати випромінювання, у зв'язку з чим дозволена відстань передачі зменшується, а кількість каналів CWDM буде менша.

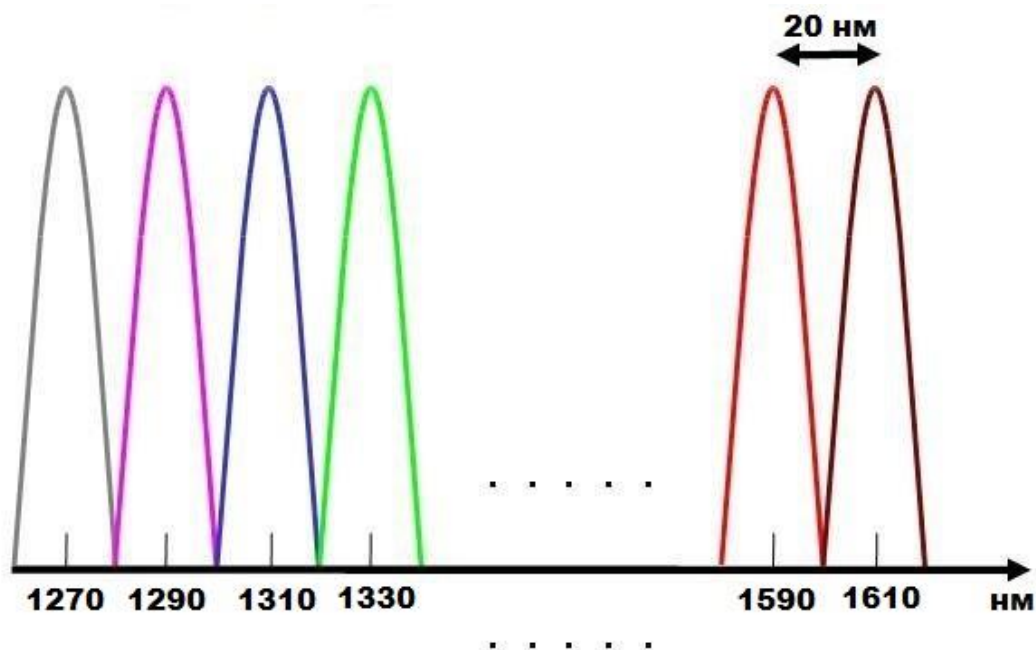


Рис. 2.1. Діапазон оптичних каналів.

На прикладі рекомендації ITU-T G.694.2, в системах CWDM присутні декілька широко відомих діапазонів: S (від 1460 нм до 1530 нм), C (від 1530 нм до 1565 нм), L (від 1565 нм до 1625 нм). Також використовуються ще два діапазони: O (original, основний) від 1260 до 1360 нм і E (extensive, розширений) від 1360 до 1460 нм. У сукупності всі діапазони охоплюють область від 1260 до 1625 нм, в якій розташовується 18 каналів з кроком 20 нм.

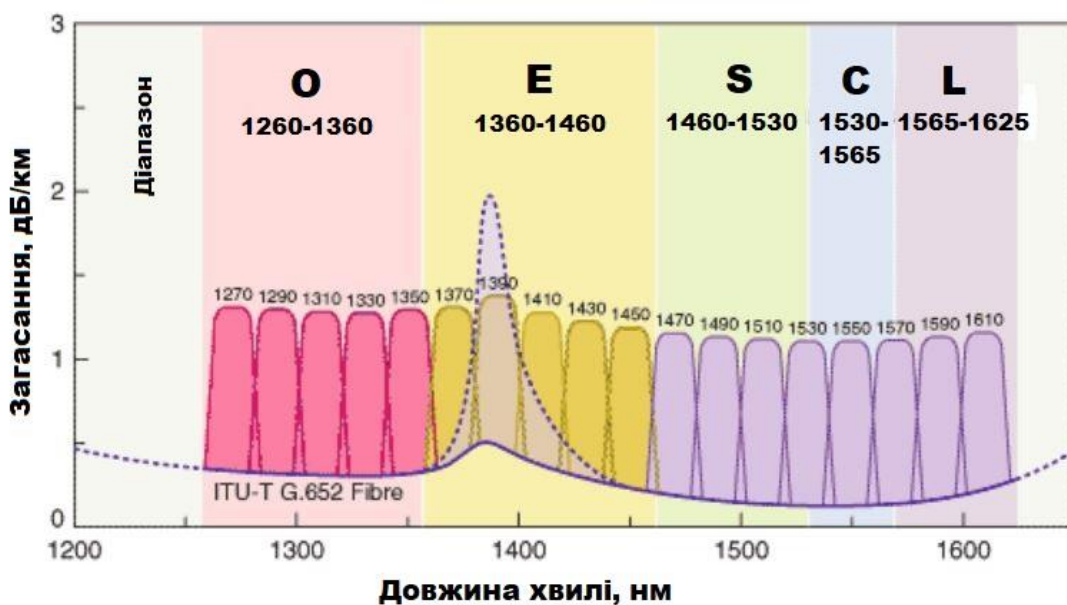


Рис. 2.2. Розподіл каналів CWDM відповідно до рекомендації G-694.2 [5].

Затухання на довжинах хвиль 1270 нм та 1290 нм достатньо велике – тому цей діапазон рідко використовується в системах CWDM.

Технологія грубого мультиплексування стає все більш поширеною, особливо в міських та регіональних мережах. Найбільші постачальники телекомунікаційних послуг у містах оновлюють мережу та, крім раніше використовуваних мереж, типу Ethernet/IP, починають використати CWDM. Воно дозволяє вирішити проблеми нестачі пропускної здатності, одночасно підвищуючи економічну ефективність використання мережі та мінімізуючи капітальні витрати на її побудову.

Міські та регіональні мережі являють собою найбільші сегменти ринку, які динамічно розвивають телекомунікації і передбачають використання, для передачі даних, великої кількості різних протоколів. Будучи прозорими для трафіку, будь-якого типу та швидкості, пристрої CWDM можуть стати частиною у зв'язку між магістраллю та мережею доступу [5].

2.1. Умови використання систем CWDM.

Основні випадки, в яких використання таких систем є доцільним:

- 1) міські та регіональні оптичні мережі;
- 2) мережа будується в умовах дефіциту оптичного волокна (або висока вартість оренди ОВ);
- 3) потреба збільшити пропускну здатність існуючих мереж на основі оптичного волокна;
- 4) надання багатьох волоконно-оптичних послуг;
- 5) оренда «віртуального» волокна.

Рішення CWDM не залежать від різних протоколів передачі інформації. Ця властивість дозволяє використовувати великий набір телекомунікаційних послуг в одному транспортному середовищі.

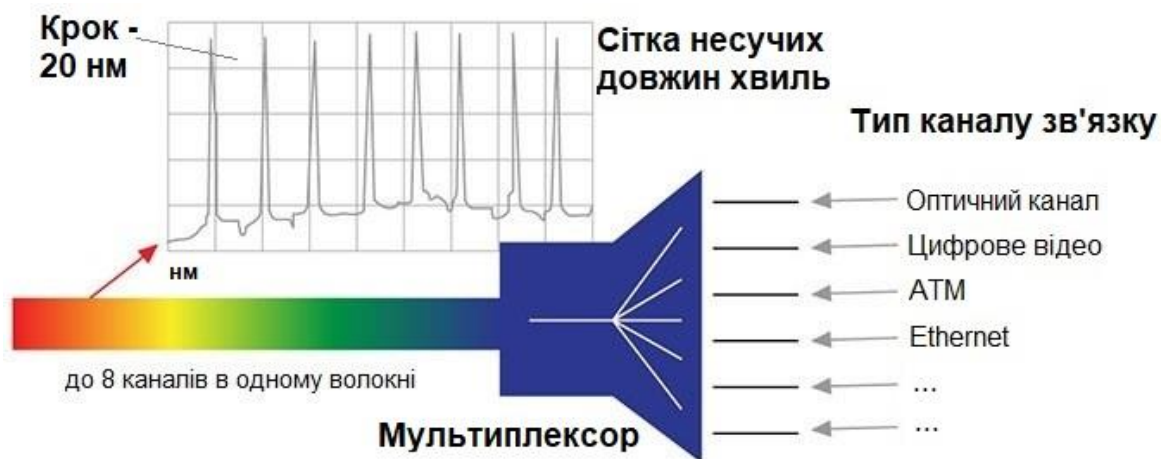


Рис. 2.3. Додавання CWDM в оптичну транспортну систему [6].

Ущільнення створює до 8 логічних пар каналів, використовуючи різні довжини хвиль, по одному волокну. Це дозволяє утворювати будь-яку комбінацію сервісів по одному кабелю.

CWDM є кращим рішенням при побудові каналів протяжністю до 80 км. Як правило, до цієї категорії належать лінії зв'язку між вузлами доступу і комутаційними центрами мережі провайдера. Такі рішення дозволяють помітно заощадити на витратах в процесі будівництва і модифікації волоконних ліній, вузлів, оренди волокна, забезпечуючи високу ступінь ефективності, безпеки, стійкості і якості обслуговування з'єднання.

В системах грубого спектрального ущільнення, відповідно до рекомендації MSE G.694.2 слід використовувати не більше 18 несучих довжин хвиль з кроком 20 нм: від 1270 до 1610, тобто загальна ширина діапазону довжин хвиль не перевищує 340 нм. Необхідно звернути увагу на те, що на обох кінцях, такого невеликого проміжку, загасання достатньо велике, що особливо помітно в області коротких довжин хвиль. Отримати кількість каналів до 18, дозволяють волокна з нульовим водяним піком, такі як ZWPF (Zero Water Peak Fiber), LWPF (Low Water Peak Fiber). Таке волокно має усунений пік поглинання на довжині хвилі 1383 нм та величина загасання складає близько 0,3 дБ/км, що цілком підходить для систем CWDM.

Волокно G.653 виявилося непридатним для нової технології спектрального мультиплексування WDM із-за нульової дисперсії на 1550 нм, що призводила до різкого зростання викривлень сигналу від чотирьох хвильового зміщення в цих системах. Найбільш пристосованим оптичним волокном для щільного і високощільного WDM (DWDM і HDWDM) виявилося оптичне волокно G.655, а для розрідженого WDM (CWDM) — нещодавно стандартизоване оптичне волокно G.656.

Таблиця 2.1. Застосування різних типів волокон [6].

Тип волокна	Основне застосування
G.652.C/D	Системи SDH/CWDM/DWDM Магістральна, зонова, міська мережа, кабельне телебачення, PON, мережі FTTH Заміна волокна G.652.A/B з вікном прозорості на 1400 нм
G.655	Системи SDH/DWDM Від 2.5 до 10 Gbit/s на один оптичний канал Магістральна, зонова, міська мережа
G.655, G.656	Системи SDH/CWDM/DWDM Від 10 до 100 Gbit/s на один оптичний канал Магістральна, зонова, міська мережа

Створення волокон без "водяного піку" дозволило використовувати в системах зв'язку усі хвилі в діапазоні від 1270 до 1610 нм, – частина спектру, де оптичне волокно має найбільшу прозорість [6].

2.2. Обладнання CWDM.

CWDM системи є складовою місцевої мережі зв'язку і встановлюються між двома або більше вузлами зв'язку. Для того, щоб забезпечити роботу такої системи,

на вузлі зв'язку потрібна наявність активного мережевого обладнання з достатньою сумарною кількістю портів для встановлення SFP-трансиверів (Small Form-factor Pluggable). Подібним мережевим обладнанням зазвичай є комутатори і маршрутизатори. У випадку дефіциту обладнання з необхідною сумарною кількістю SFP портів, можливе використання медіаконверторів зі слотами під CWDM SFP-трансивери, що є економічно вигіднішим у деяких випадках.

Отже, можемо виділити головні елементи CWDM системи:

- 1) мультиплексор/демультиплексор (англ. multiplexer/demultiplexer, MUX/DEMUX) — дозволяє змішувати та розділяти оптичні сигнали.
- 2) OADM модулі (optical add-drop multiplexer) — мультиплексори введення/виведення, дозволяють додати або виділити сигнал у оптичному волокні.
- 3) SFP модулі (трансивери) — формують та приймають оптичні сигнали на визначених довжинах хвиль в CWDM системі. Відносяться до активного обладнання, переводять сигнал з електричного в оптичний та навпаки [7].

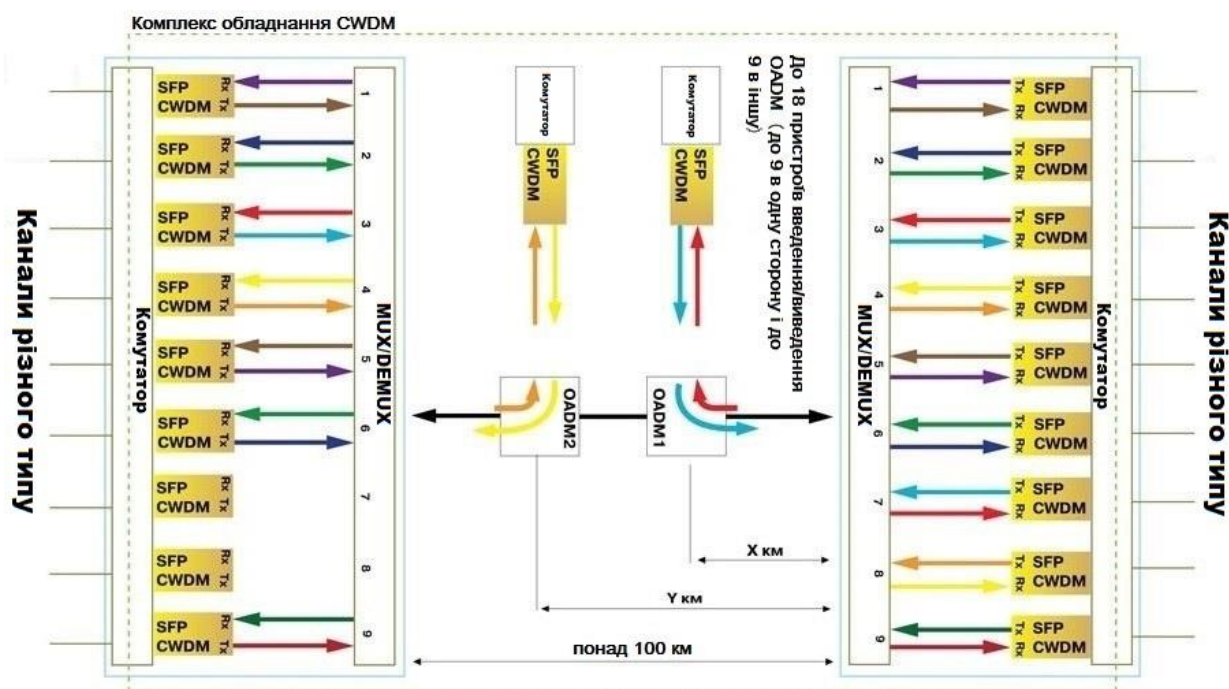


Рис. 2.4. Комплекс обладнання CWDM [7].

Варто звернути увагу на той факт, що мультиплексори/демультиплексори та SFP модулі працюють у парах. Відповідно, це обладнання типу I та II. Ця потреба

пов'язана з тим, що кожен канал на різних кінцях має дзеркальні значення для прийому (Rx) і передачі (Tx), оскільки він формується з двох довжин хвиль.

2.2.1. SFP модулі.



Рис. 2.5. CWDM SFP трансивери.

SFP — загальноприйнятий промисловий формат для виробництва переставних трансиверів. Трансивери широко використовуються в активному мережевому обладнанні: маршрутизатори, комутатори, медіаконвертери. Лазери з розподіленим зворотнім зв'язком (англ. Distributed Feedback, DFB), які використовуються в системах CWDM, не вимагають температурної стабілізації, громіздких та складних схем керування, та водночас є невеликими та економічними. Типовий DFB-лазер має температурну стійкість, яка допускає коливання сформованої довжини хвилі в діапазоні 6-8 нм в проміжку температур від 0 °C до 70 °C.

SFP трансивери призначені для формування «основних несучих» оптичних сигналів з діапазону грубого спектрального ущільнення: від 1270 до 1610 нм з кроком 20 нм. Кожен пристрій працює на двох волокнах і, на відміну від стандартних двохволоконних трансиверів, має дві різні довжини хвилі з двох вікон прозорості — передатчик на одній, отримувач на іншій. При створенні лінії передачі у системі

CWDM SFP, приймально-передавальні пристрої встановлюються "попарно" типу 1 і типу 2 (Type 1 та Type II).

Таблиця 2.2. Маркування каналів даних в системі CWDM SFP [7].

Колір	Type I	Type II
Сірий	Tx1470/Rx1310	Tx1310/Rx1470
Фіолетовий	Tx1490/Rx1330	Tx1330/Rx1490
Синій	Tx1510/Rx1350	Tx1350/Rx1510
Зелений	Tx1530/Rx1370	Tx1370/Rx1530
Жовтий	Tx1550/Rx1390	Tx1390/Rx1550
Помаранчевий	Tx1570/Rx1410	Tx1410/Rx1570
Червоний	Tx1590/Rx1430	Tx1430/Rx1590
Коричневий	Tx1610/Rx1450	Tx1450/Rx1610

Внаслідок того, що CWDM системи пасивні, здійснення моніторингу стану CWDM обладнання та усієї траси в режимі реального часу викликає труднощі. Для online моніторингу використовуються CWDM SFP трансивери з функцією DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Вона дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри, котрі має SFP трансивер:

- 1) потужність вхідного сигналу (RX);
- 2) потужність вихідного сигналу (TX);
- 3) температурні параметри роботи трансивера.

Моніторинг параметрів дозволяє визначати цілісність та знос CWDM лінії. DDM також корисна при оцінці оптичного бюджету CWDM рішення. Порівняння даних з трансиверів дає можливість визначити реальні втрати по несучим довжинам хвиль у волокні.

SFP трансивери відрізняються по відстаням роботи (потужності сигналу). У рішеннях CWDM, стандартний кілометраж знаходиться на позначках у 10 км, 20 км, 40 км, або навіть 80 км [7].

2.2.2. Оптичні мультиплексори.

Оптичні мультиплексори та демультиплексори призначені для об'єднання та розділення оптичних сигналів відповідно, переданих на довжині хвиль з діапазону спектрального ущільнення, по одномодовому оптичному волокну. Прилад призначений для роботи з CWDM SFP трансиверами, утворюючи 4 або 8 каналів на 8-ми або 16-ти довжинах хвиль в одному волокні, або до 32 каналів у двох волокнах.

Пристрої характерні низьким відбиттям сигналу, високою ізоляцією каналів та невеликими втратами. Мультиплексори WDM є двонаправленими пристроями, які можуть як розщеплювати, так і суміщати оптичні сигнали. Пристрої доступні в різних конструкціях, що дозволяє їх використовувати в різних системах передачі.

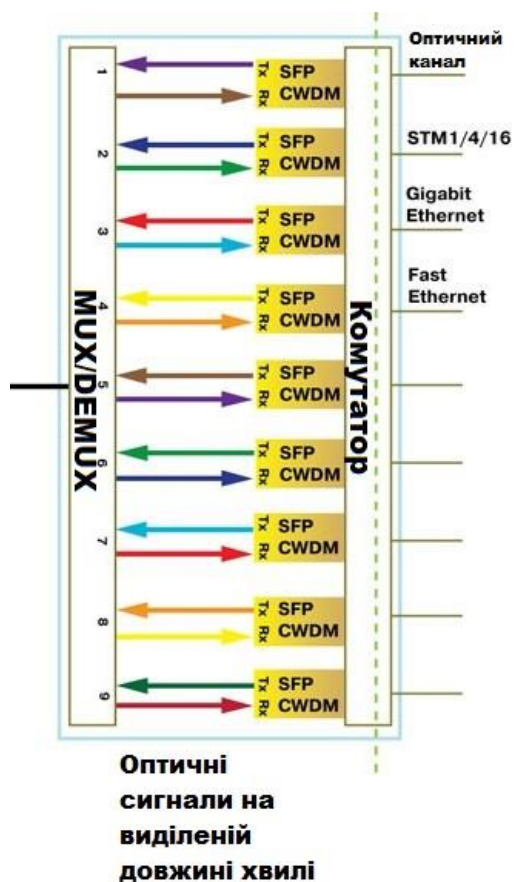


Рис. 2.6. Оптичний мультиплексор/демультиплексор.

В залежності від призначення конфігурація CWDМ мультиплексора/демультиплексора визначається за наступними характеристиками:

- 1) двохволоконний мультиплексор (2 fiber);
- 2) одноволоконний мультиплексор (single fiber або bidirectional);
- 3) 4-х або 8-ми канальний мультиплексор (8 або 16 довжин хвиль), що працює на одному волокні;
- 4) 8-ми або 16-ти канальний, що працює на двох волокнах;
- 5) мультиплексор з двома "загальними" (COMMON) виводами для реалізації "кільцевої" топології;
- 6) за типом топології;
- 7) за типом конекторів (FC, SC, LC, ST, FA, SA);
- 8) за типом монтажу (в стійку, в муфту або на стіну).

2.2.3. Будова мультиплексорів/демультиплексорів.

MUX / DEMUX призначені для поєднання окремих одиничних каналів WDM у груповий сигнал для одночасної передачі у межах одного волокна, а також для їх поділу (демультиплексування) на стороні отримувача. Їх основними компонентами є одноканальні фільтри, зроблені з використанням багатошарових тонкоплівкових фільтрів (англ. Thin Film Filter).

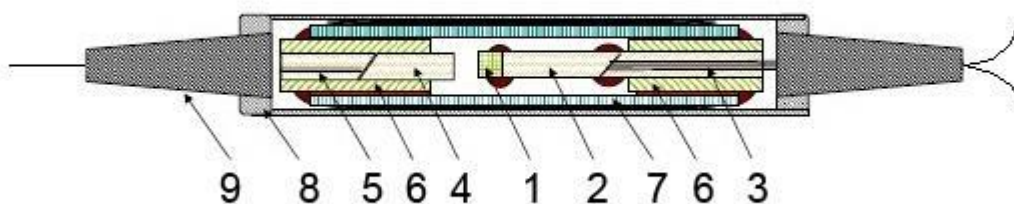


Рис. 2.7. Одноканальні фільтри CWDM, виготовлені з використанням багатошарових тонкоплівкових фільтрів Thin Film Filter.

Основні складові частини: 1 - тонкоплівковий фільтр, 2 - G лінза, 3 - двохволоконний пігтейл, 4 - С лінза, 5 - одноволоконний пігтейл, 6 - скляна трубка, 7 - кварцова трубка, 8 - сталева або пластикова трубка, 9 - захисний наконечник [8].

Фільтр працює за наступним принципом: оптичний сигнал на частоті, яка відповідає одній з складових сітки CWDM, може передаватися між портами фільтра Pass і Com. Затухання сигналу між цими портами становить від 0,3 дБм до 0,8 дБм. Інші довжини хвиль діапазону CWDM не передаються між цими портами, тобто вони фільтруються та передаються між Reflection- та Com-портами. Внесене затухання оптичного сигналу між цими портами – також від 0,3 дБм до 0,8 дБм. Pass- та Reflection- порти ізолювані один від одного, оптичний сигнал між ними не передається.

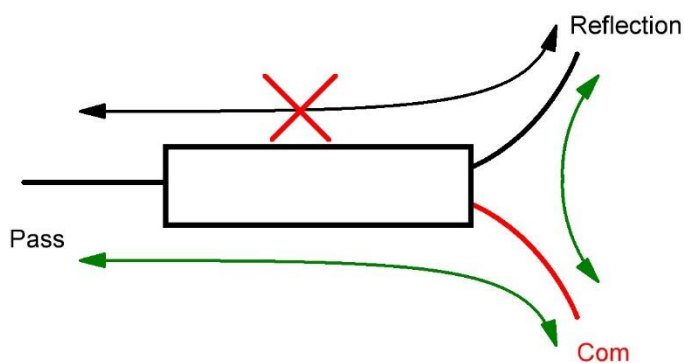


Рис. 2.8. Схема взаємодії портів фільтру.

При виборі фільтрів CWDM, окрему увагу слід приділити частотному діапазону або смузі пропускання між портами Pass і Com, на який налаштований фільтр.

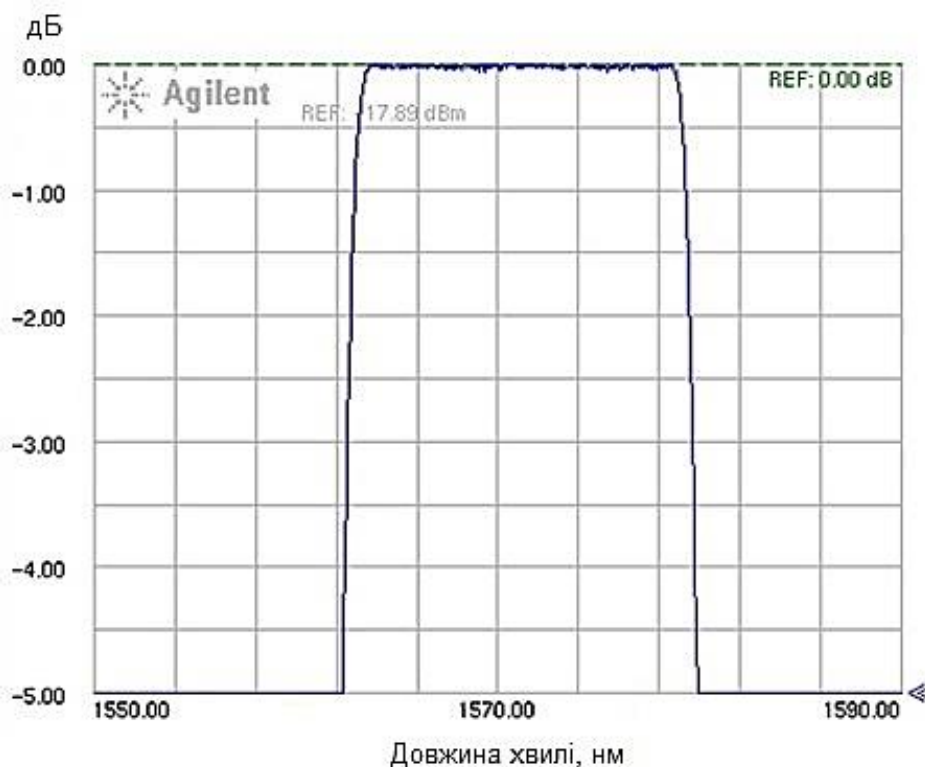


Рис. 2.9. Частотний діапазон або смуга пропускання між портами Pass і Com, на який налаштований фільтр [8].

При передачі сигналу трансивером, його ширина сигналу становить 1 нм. Лазери, що використовуються в таких приймально-передавальних приладах, не мають температурної стабілізації, тому частота хвилі носія в них може зміщуватись. У якісних приймально-передавальних пристроях довжина хвилі може змінюватися в діапазоні від 6 до 7,5 нм від центральної частоти несучої хвилі, однак є зразки приймально-передавальних пристроїв, де цей діапазон є набагато ширшим. Якщо частота лазера не відповідає робочому діапазону фільтра, може статися ситуація (наприклад, при нагріванні лазера), коли переданий оптичний сигнал, що проходить через фільтр, буде істотно ослаблений або повністю подавлений фільтром. Саме по цій причині при створенні та проектуванні систем CWDM необхідно порівнювати характеристики трансиверів та використовуваних фільтрів.

2.2.4. Традиційна схема мультиплексора CWDM

Наведемо приклад принципової схеми оптичного мультиплексора/демультиплексора CWDM на основі тонкоплівкових фільтрів.

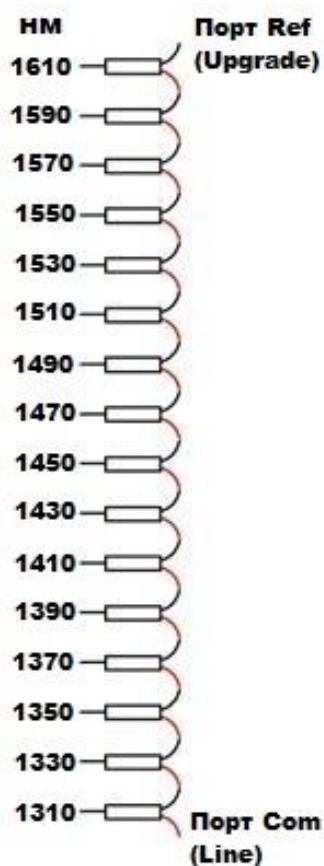


Рис. 2.10. Схема з послідовним з'єднанням фільтрів. MUX/DEMUX на 16 довжин хвиль або 8 каналів CWDM).

Кожен фільтр працює на визначеній довжині хвилі з сітки CWDM, та з'єднуються один з одним наступним чином: порт Com з портом Reflection наступного. Порт Reflection першого фільтру в ланцюзі позначається як Upgrade, порт Com останнього – як Line, він включається в лінію. Внесене загасання на всьому мультиплексорі для кожного каналу N можна розрахувати за формулою:

$$IL = IL_{Pass-Com} + (IL_{Ref-Com}(N-1)),$$

де $IL_{Pass-Com}$ — загасання на ділянці Pass-Com фільтру N, $IL_{Ref-Com}$ — усереднене значення внесеного загасання на ділянці Reference-Com одного фільтру.

Такий устрій дозволяє застосовувати для прийому та передачі будь-які комбінації довжин хвиль, у більшості випадків вони обираються виходячи із характеристик трансиверів CWDM [8].

В оптичній лінії, величина внесеного загасання залежить від довжини хвилі (наприклад, для 1550 нм воно складає приблизно 0,2 дБм на кілометр, а для 1310 нм — приблизно 0,4 дБм на кілометр), необхідно розташовувати фільтри таким чином, щоб "нижні" довжини хвиль розташовувалися ближче до порту Com мультиплексора. Таким чином внесене загасання для каналів які працюють на такій частоті, є меншим, ніж для "верхніх" довжин хвиль. Значення максимального внесеного загасання, вказане в технічних характеристиках мультиплексора, розраховується виходячи з величини загасання для найвіддаленішого від порту Com фільтру.

2.2.5. Мультиплексор CWDM зі зменшеним внесеним загасанням

Крім класичного варіанту, описаного у розділі вище, також присутні інші рішення, зокрема зі зменшеним внесеним загасанням на мультиплексорі CWDM, (MUX/DEMUX на 16 довжин хвиль). Будова складається з двох окремих пристроїв, зібраних за послідовною схемою. Перша частина складається з 8-ми фільтрів, налаштованих на довжини хвиль від 1610 нм до 1470 нм, друга — також з 8-ми за довжинами хвиль від 1310 нм до 1450 нм. Порти Com обох пристроїв з'єднуються із смуговим тонкоплівковим фільтром.

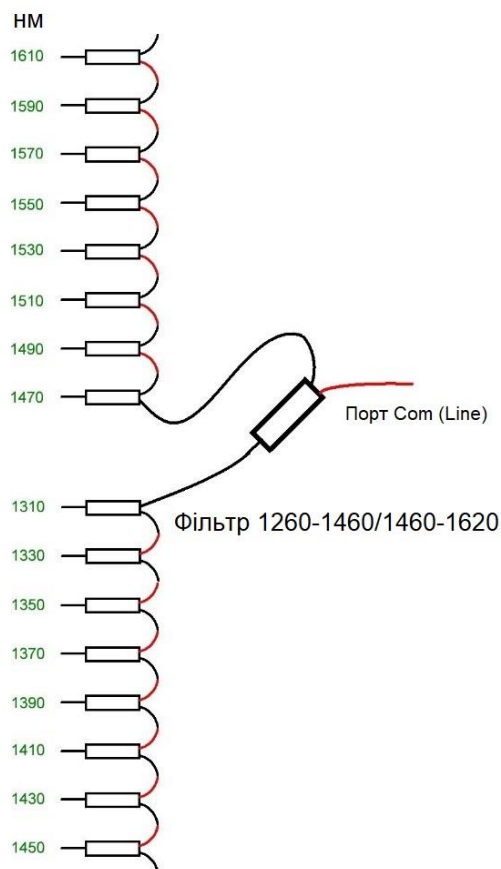


Рис. 2.11. Конструкція MUX/DEMUX зі зменшеним внесеним загасанням.

Конструкція смугового фільтра схожа з одноканальним, його відмінність — діапазон довжин хвиль, які пропускаються, між портами Pass і Com — від 1260 до 1460 нм, і між портами Ref і Com — від 1460 до 1610 нм. Цей фільтр ділить діапазон довжин хвиль CWDM навпіл. Внесене загасання смугового фільтра відповідає значенню одноканального. Максимальне внесене загасання неважко розрахувати за наведеною в попередньому пункті формулою, його значення майже у два рази менше від попереднього рішення, при однакових виконуваних функціях.

В пристрої зі зменшеним внесеним загасанням, присутня можливість збільшити дальність роботи системи CWDM приблизно на 7,5 кілометрів для "нижніх" довжин хвиль і на 15 кілометрів для "верхніх", без заміни оптичних трансиверів. Подібний прилад, з такою самою кількістю довжин хвиль, матиме вищу ціну. Подібне рішення набуває актуальності при необхідності збільшити відстань передачі оптичного сигналу без витрат на додаткову регенерацію.[8]

2.2.6. OADM рішення.

Додатково звернемо увагу на модулі введення/виведення (Add/Drop), що виділяють довжини хвиль з CWDM потоку (оптичної лінії).

Основні властивості:

- 1) введення/виведення одного CWDM каналу;
- 2) пасивний елемент;
- 3) низькі внесені втрати для транзитних CWDM каналів;
- 4) виділена довжина хвилі кінцевому користувачу.

Розрізняють OADM рішення на одноканальні та двоканальні. Відмінність полягає в здатності приймати та передавати оптичний сигнал від одного або двох мультиплексорів і фізично обумовлена наявністю одного або двох приймально-передавальних блоків. Одноканальний OADM відповідно має один блок прийому/передачі та здатний працювати тільки з одним мультиплексором в "один бік". Двоканальний OADM має два блоки прийому/передачі та здатний працювати "в дві сторони" з двома мультиплексорами/демультиплексорами [8].

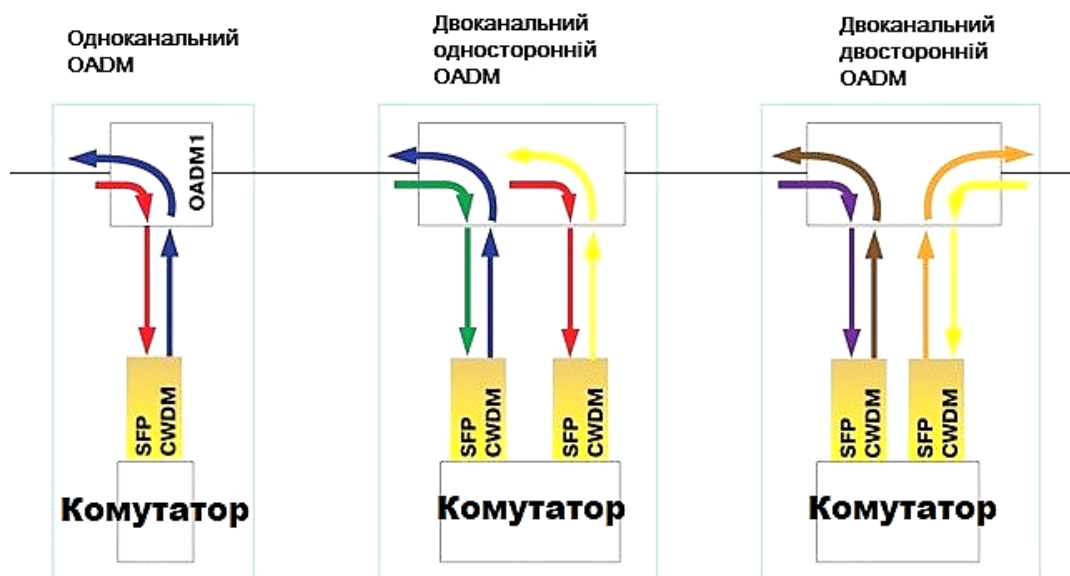


Рис. 2.12. Блок прийому/передачі одноканального та двоканальних OADM.

2.3. Типи топологічних рішень.

2.3.1. Топологія «Точка — Точка».

В основному мережі міст не зазнавали змін протягом тривалого часу. Постійне збільшення трафіку призводить до дефіциту існуючих ресурсів. «Виснаження волокон», тобто нестача пропускної здатності є тією проблемою, яку оператори зв'язку хотіли б вирішити негайно. Додавання CWDM системи з топологією "Точка-Точка" в оптичну лінію передачі, це просте і економічно вигідне рішення проблеми нестачі волокон. Саме такий тип топології є найбільш цікавим при побудованні нашої мережі.

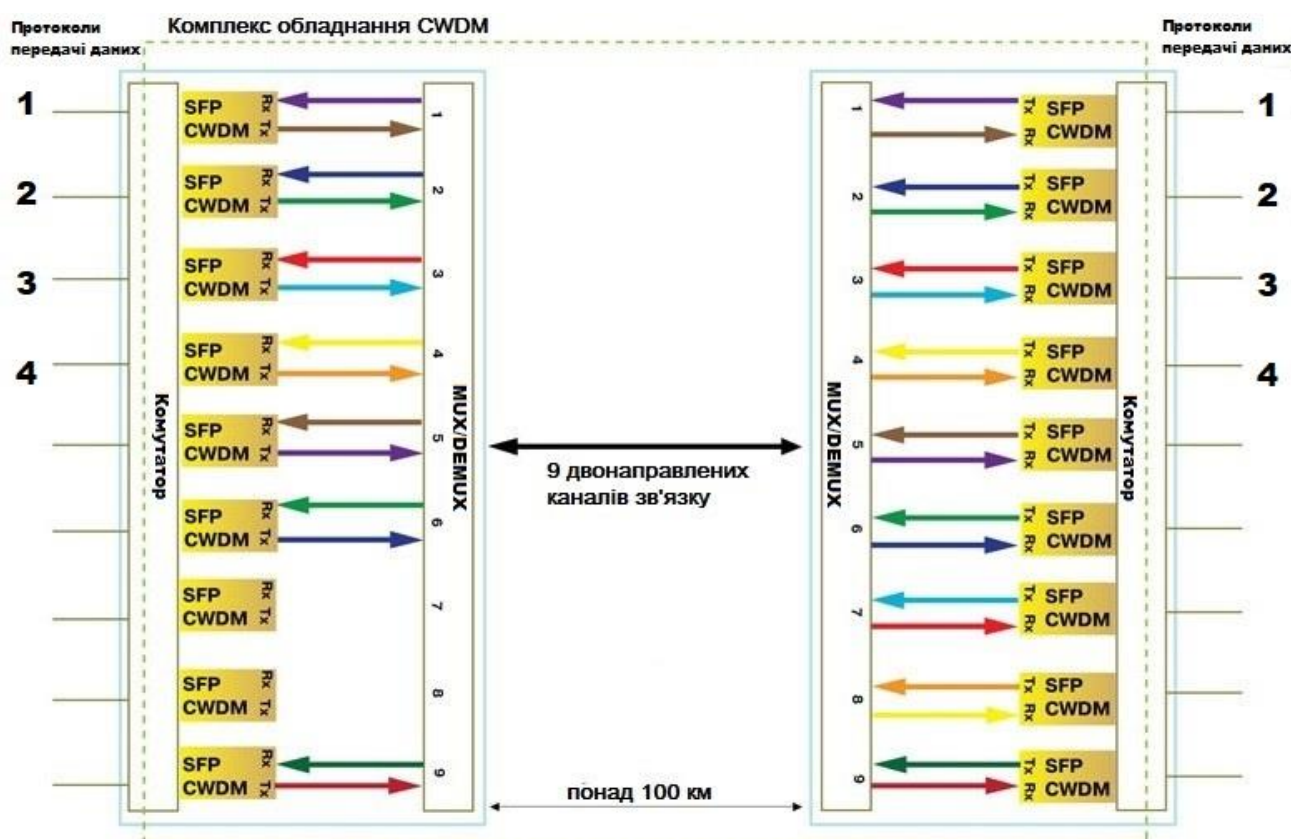


Рис. 2.13. Система з топологією «Точка-Точка».

Лінії зв'язку з подібною топологією найбільш характерні для вирішення завдань одночасної передачі великої кількості потоків даних, збільшується кількість

одночасно наданих сервісів. В такому випадку використовують волокна існуючої оптичної транспортної мережі. Інформація передається по каналах між двома точками. Для передачі даних на великі відстані потрібні мультиплексори/демультиплексори в тих вузлах, де відбуватиметься об'єднання інформаційних потоків і подальше їх роз'єднання.

При побудові системи CWDM з топологією «Точка – Точка» необхідно використовувати MUX/DEMUX Type I і Type II та до них відповідно попарно SFP трансивери Type I і Type II.

2.3.2. Топологія «З'єднання з відгалуженням».

Додатково можемо виділити топологію «з'єднання з відгалуженням». Така архітектура реалізує передачу інформації від одного вузла до іншого з проміжними вузлами на цьому шляху, де можливе введення і відведення окремих каналів із застосуванням модулів OADM. Максимальна кількість відгалужень визначається кількістю дуплексних каналів передачі (наприклад, 4 або 8) і оптичним бюджетом лінії. При розрахунках треба пам'ятати про те, що кожен OADM модуль вносить загасання, внаслідок чого загальна протяжність тракту відповідно знижується. Оптичний канал можна здобути в будь-якій точці тракту.

2.4. Переваги системи з грубим спектральним мультиплексуванням.

Відповідно до матеріалу викладеного вище, маємо можливість виділити перелік наступних переваг:

- 1) економія оптичного волокна — CWDM дозволяє передавати по одному волокну до 8 різних каналів передачі даних.

- 2) незалежність від клієнтських протоколів — передача до 8-ми незалежних сервісів по одному оптичному волокну; прозорість для протоколів передачі даних.
- 3) відносна незалежність від електроживлення — електропостачання потрібне лише для активного обладнання.
- 4) відсутність ситуацій "падіння", перезавантажень та ін., так як система є пасивною.
- 5) відсутність необхідності організації тривалого доступу до місць розміщення елементів CWDM системи — існують модулі OADM у виконанні для розміщення в оптичних муфтах.
- 6) зниження впливу "людського чинника". Зумовлено відсутністю активних компонентів, що вимагають налаштування, управління та ін.
- 7) значне зниження вартості експлуатаційних витрат.
- 8) відносно невисока собівартість — питома ціна одного каналу в CWDM системі нижча, ніж в варіанті на активному обладнанні.
- 9) максимальна відстань роботи CWDM системи складає понад 80 кілометрів.
- 10) наявність різних видів устаткування для монтажу в різних умовах: на стіну, у стойку, у муфту.

2.5. Рівень доступу.

За сервіси другого рівню, захист мережі від атак і небажаного трафіку з боку абонентів відповідає рівень доступу. Кількість обладнання рівня доступу є найбільшою, воно встановлюється у будівлях (під'їзді житлового будинку чи технічних приміщеннях), та повинно відповідати наступним вимогам: низька вартість портів абонентів, достатня надійність (відсутність рухомих деталей, наприклад вентиляторів, які вимагають періодичного очищення та заміни), захист від статичної електрики та широкий температурний діапазон.

Розглянемо декілька рекомендацій та реально існуючих варіантів побудови рівня доступу та топології мережі.

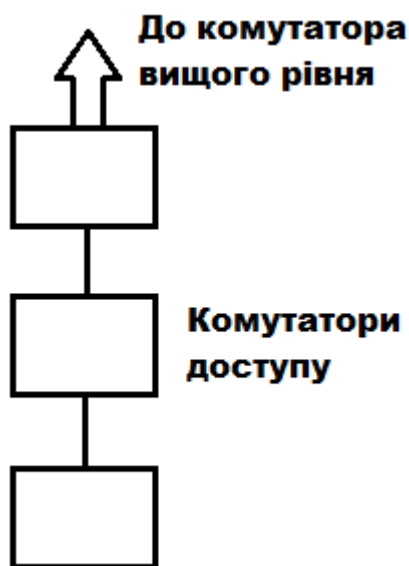


Рис. 2.14. Топологія "ланцюг".

Найпростіший вид будови. Мережеві пристрої (комутатори доступу) сполучені послідовно.

Головні недоліки цього рішення:

- 1) відсутність резервування;
- 2) відсутність запобігання відмови — несправність однієї частини може призвести до відмови усього ланцюга;
- 3) взаємний вплив — шкідливий, або небажаний, трафік впливає на увесь ланцюг;
- 4) надмірні вимоги до комутаторів — комутатори в ланцюгу додатково оброблюють трафік інших комутаторів [9].

Замкнувши кінцеві пристрої в ланцюгу, ми отримуємо наступну топологію — "кільце"(рис. 2.15).

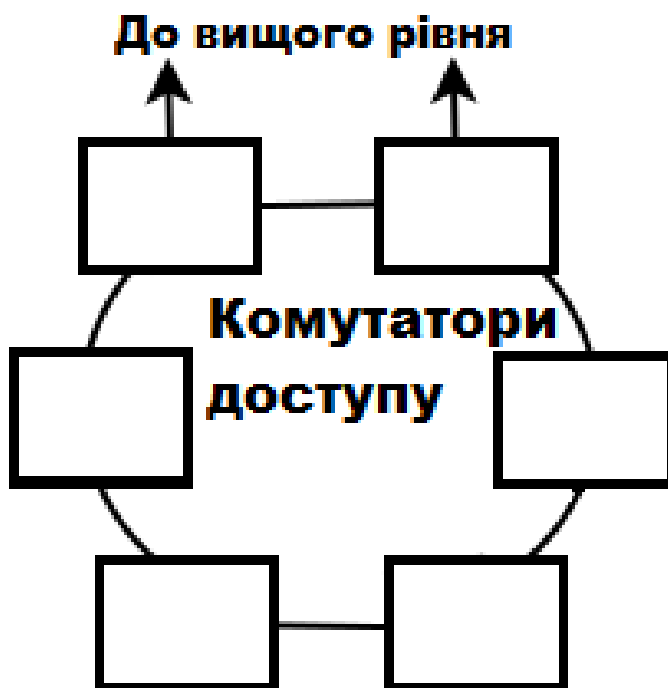


Рис. 2.15. Топологія "кільце".

Єдина перевага такої топології в тому, що тут присутнє деяке резервування: при відмові однієї точки цілком можлива робота інших вузлів. Однак зберігаються усі інші недоліки ланцюга, а також додається необхідність налаштування мережевого протоколу STP (Spanning Tree Protocol), що дозволяє уникнути утворення логічних петель, який потребує додаткового часу на спрацювання при відмові вузла в кільці.

Перейдемо до наступної топології «Зірка» (рис. 2.16).

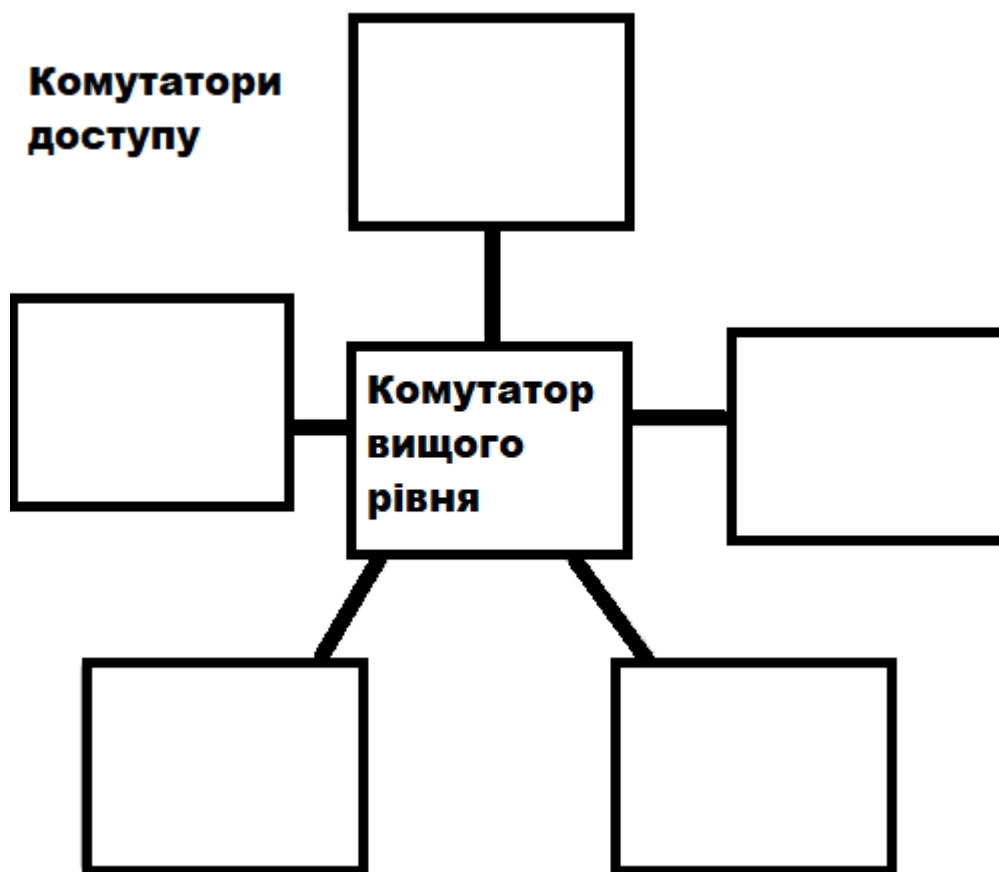


Рис. 2.16. Топологія «зірка».

Її особливість в тому, що тут присутній комутатор вищого рівня ієрархії — агрегації. Комутатори доступу ізольовані один від одного і єдиною точкою їх з'єднання є вузловий комутатор.

До переваг можемо віднести:

- 1) відсутність взаємного впливу;
- 2) відсутність небажаного трафіку через комутатор доступу;
- 3) стійкість до відмов;
- 4) ізоляція шкідливого трафіку;
- 5) простота визначення несправності;

Жодне рішення не залишиться без переліку недоліків:

- 1) відсутність резервного зв'язку між рівнями агрегації і доступу;
- 2) єдина точка відмови — комутатор агрегації.

Для усунення вказаних недоліків застосовується модифікована варіація — «Подвійна зірка» (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Топологія «Подвійна зірка».

Саме це рішення є найбільш цікавим та актуальним для нашої роботи. Тут присутня додаткова зв'язність між кожним із комутаторів доступу та вузловими комутаторами. Два вузли сприяють усуненню єдиної точки відмови [9].

3. «УРАН» — УКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ОСВІТНЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА.

3.1. Історія розвитку мережі.

Асоціація «УРАН» (Ukrainian Research and Academic Network, URAN) існує з 1996 року. Саме створення відбулося в 1997 році Спільною постановою Президії Національної Академії наук України і Колегії Міністерства освіти України. В 2006 році перереєстрована на підставі Наказу Міністерства освіти і науки «Про створення Всеукраїнської Асоціації УРАН» від 13 березня 2006 року № 181.

Головна мета створення і діяльності Асоціації – координація дій та об'єднання зусиль Членів Асоціації для сприяння до створення, розвитку та використання єдиної національної науково-освітньої телекомунікаційної мережі України – «Комп'ютерна мережа закладів вищої освіти і науки України», для підвищення рівня освіти та науки, розвитку засад інформаційного суспільства, повноправного входження України в глобальний інформаційний простір і представництва інтересів Членів Асоціації в органах державної влади, а також в українських та міжнародних організаціях. Асоціація є відкритою для нових членів і діє відповідно до Статуту.

У 2007 році мережу «УРАН» було визнано національною мережею, що дало змогу стати представником України у проєкті GÉANT, та дало технічну можливість науковцям з України брати участь у спільних з ЄС проєктах з високими вимогами до пропускної здатності каналів передачі даних з Європейським центром ядерних досліджень ЦЕРН (Швейцарія), для реалізації спільних проєктів з фізики високих енергій.

З 2010 року користувачі отримали доступ до сервісу проведення відео конференцій, доступ до яких є безкоштовним. Кількість користувачів для одночасної участі у конференції, обмежується лише ліцензією, яка сьогодні авторизує до 30 з'єднань і за потреби може бути розширена.

Сьогодні до Асоціації входять 83 наукових, освітніх та культурних закладів з усіх регіонів України [10].

3.2. Технічні характеристики.



Рис. 3.1. Карта покриття мережі «УРАН» в Україні.

Сьогодні мережа УРАН фізично об'єднує понад 80 науково-дослідницьких та освітніх закладів, приблизно 180 точок підключення, та експлуатує власні волоконно-оптичні лінії в 15 містах України загальною довжиною близько 230 км. Зокрема, до мережі під'єднано приблизно половина всіх українських ВНЗ (III—IV рівнів акредитації), в яких навчається близько 66 % всіх студентів країни.

Сегмент будується за ієрархічним принципом: в кожному місті, що є значним осередком наукової та освітньої діяльності, створюється регіональний вузол мережі на базі університету або наукової установи міста.

Підключення до мережі відбувається виключно через виділені лінії зв'язку по волоконно-оптичних або мідних жилах. Користувачі мають змогу використати підключення на максимально можливій фізичній швидкості, вона обмежується виключно технічними характеристиками каналу, між двома точками зв'язку.

До переліку послуг можливо віднести: оперативний доступ та обмін інформацією, її розповсюдження та накопичення, обробка для проведення наукових досліджень, дистанційне навчання, використання методів телематики, використання електронних бібліотек, віртуальних лабораторій, проведення відео конференцій, реалізація дистанційних методів моніторингу, тощо [12].

Одночасно мережа виконує подвійну функцію:

- 1) корпоративної телекомунікаційної мережі, яка забезпечує сервіси зв'язку та об'єднує науково-освітні заклади між собою і, через пан'європейську науково-освітню телекомунікаційну мережу GÉANT, з науково-освітніми установами країн Європи;
- 2) мережі доступу в Інтернет, яка забезпечує клієнтам подачу трафіку сторонніх інтернет-провайдерів через один з існуючих шлюзів УРАН у глобальну мережу [11].

3.3. Сегмент мережі УРАН у місті Полтава.

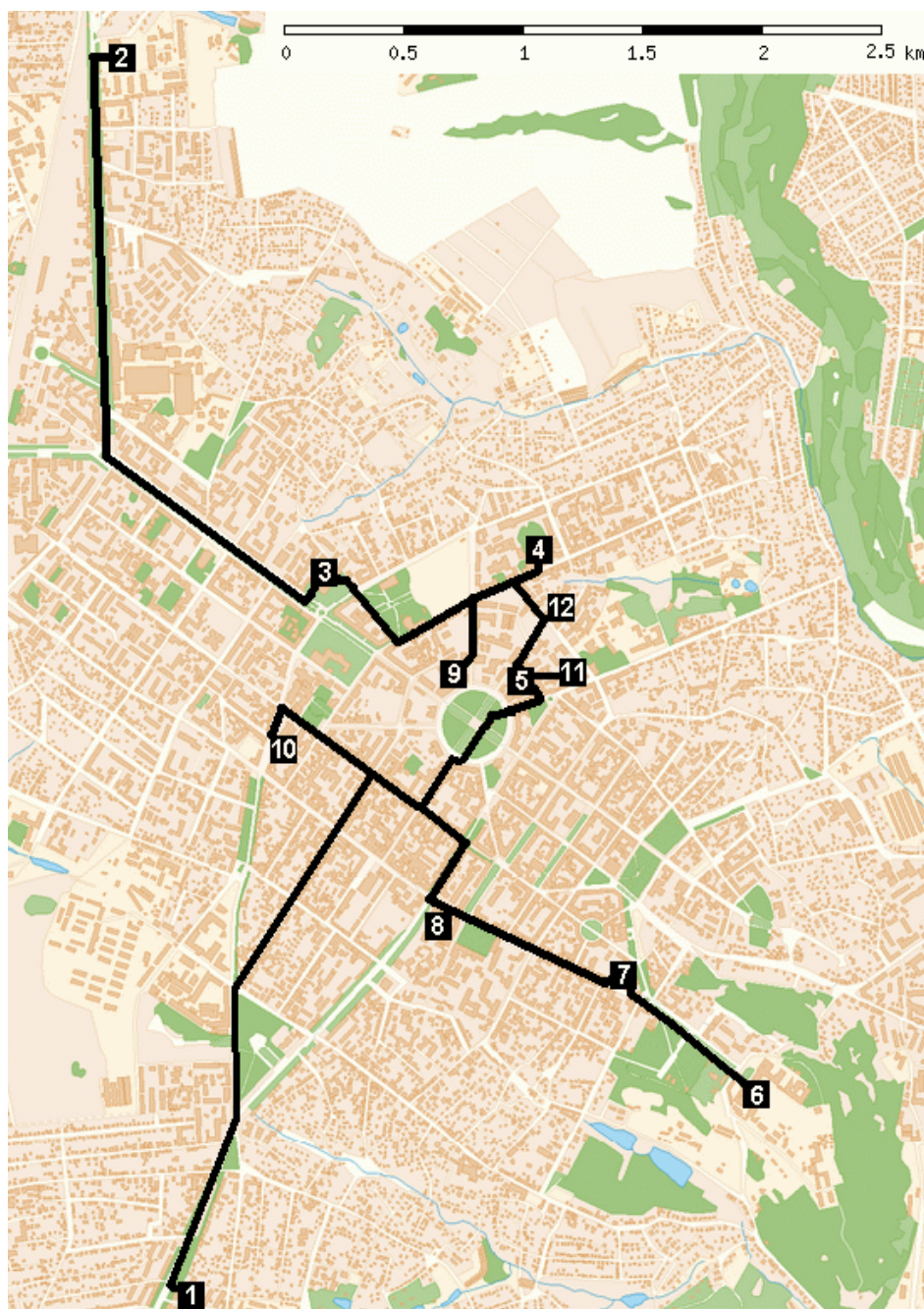


Рис. 3.2. Географічна схема мережі УРАН у м. Полтава [12].

Перелік точок підключення:

1. Вузол міжміського зв'язку: філія ЗАТ Датагруп – вул. Автобазівська, 2/9.
2. Полтавський військовий інститут зв'язку – вул. Зінківська, 44.

3. Полтавський університет економіки і торгівлі (ПУЕТ, минул. ПУСКУ) – вул. Ковалю, 3.
4. Полтавська державна Аграрна академія – вул. Сковороди, 1/3.
5. Полтавський національний педагогічний університет ім. В. Короленка (ПНПУ) – вул. Остроградського, 2.
6. Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка (ПНТУ) – Першотравневий просп., 24.
7. Полтавська державна юридична академія – Першотравневий просп., 14.
8. Українська медична стоматологічна академія – вул. Шевченка, 23.
9. ПНТУ, Центр післядипломної освіти – вул. Жовтнева, 42.
10. Міжнародний науково-технічний університет, Полтавський інститут бізнесу – вул. Сінна, 7.
11. ПНПУ, студентські гуртожитки – вул. Монастирська, 7, вул. Козака 3а, 5.
12. ПНПУ, студентський гуртожиток – вул. Козака, 10 [12].

Як і у інших містах України, Полтава має регіональний вузол мережі, що знаходиться у Полтавському університеті економіки та торгівлі (минула назва Полтавський університет споживчої кооперації), в подальшому ПУСКУ. Сегмент міста базується на прокладеному, через найбільші науково-освітні заклади міста, восьмижильному волоконно-оптичному кабелі.

На даний момент мережа в місті побудована за принципом "окреме волокно від вузла мережі до кожного із споживачів", тобто являє собою одножильну волоконно-оптичну лінію зв'язку, де по одній жилі передаються сигнали в двох вікнах прозорості: передача – в області 1550 нм, прийом – 1380 нм, і навпаки. Така технологія називається Bi-Di (bi-directional), тобто у два напрямки.

4. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ CWDM У М. ПОЛТАВА.

4.1. Аналіз наявної топології мережі та обґрунтування розробки модернізації з використанням CWDM.

Як було зазначено раніше, сегмент у Полтаві побудований на основі восьмижильної лінії зв'язку. При створенні нової мережі слід враховувати те, що чим довша відстань між точками підключення, тим менше вільних жил в нас залишається. Так як ми збираємося використати підключення типу «точка-точка», при прокладенні маршруту від вузла до найвіддаленішого клієнта, жили поступово займаються іншими абонентами.

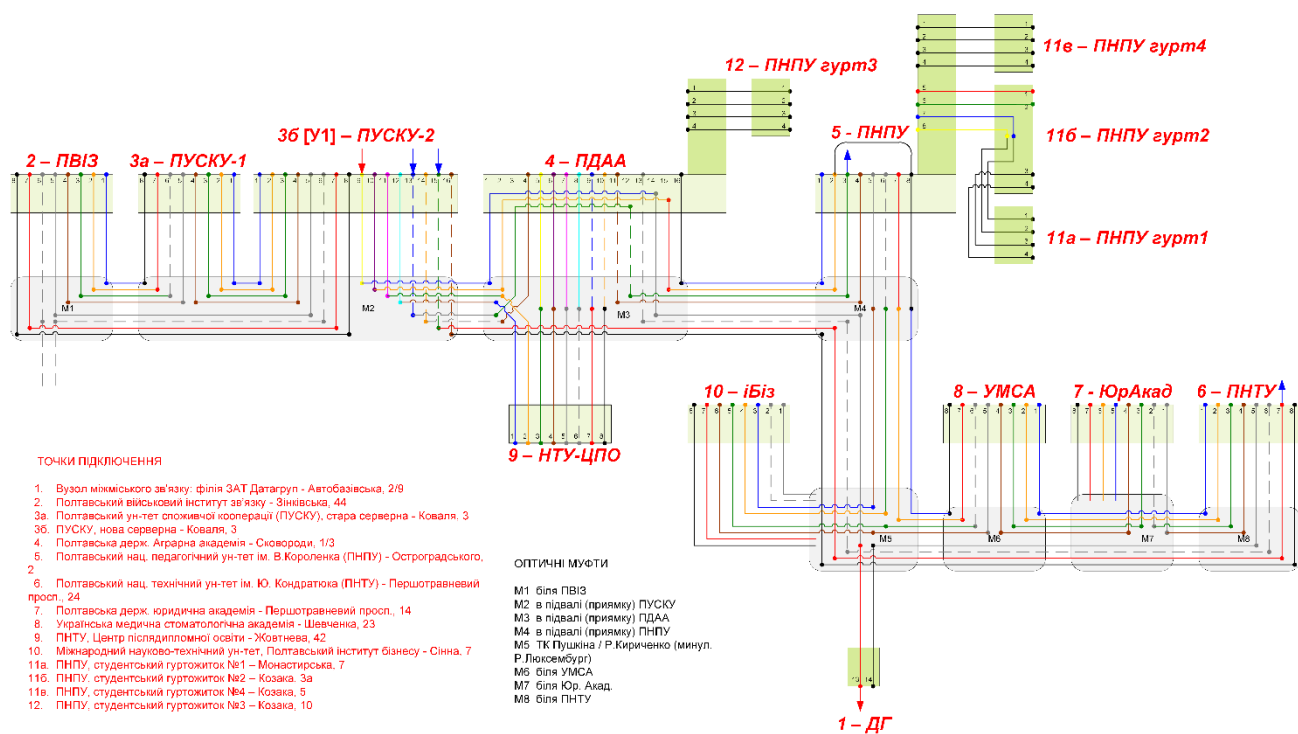


Рис. 4.1. Топологія мережі «УРАН» в м. Полтава.

Перелік та місцезнаходження оптичних муфт:

1. M1 – біля ПВІЗ.

2. М2 – у підвалі (прямку) ПУСКУ.
3. М3 – у підвалі (прямку) ПДАА.
4. М4 – у підвалі (прямку) ПНПУ.
5. М5 – ТК вул. Пушкіна/Р. Кириченко.
6. М6 – біля УМСА.
7. М7 – біля Юридичної Академії.
8. М8 – біля ПНТУ.

На даний момент у місті присутній регіональний вузол, який знаходиться у приміщеннях ПУСКУ. Фактично підключеними абонентами являються ПУСКУ, ПНПУ та ПНТУ, що зображено на рисунку 4.1, а також усі чотири гуртожитки ПНПУ. Приєднання гуртожитків розділено на дві частини, перша точка підключення у гуртожитку №2, в якому лінія передачі розподіляється між найближчими – №1 та №4, друга точка – гуртожиток №3, що має окреме з'єднання, причина – достатньо віддалене місцезнаходження.

Наша мета – створити проект модернізації існуючої мережі використовуючи технологію грубого спектрального ущільнення, забезпечивши підведення до основних клієнтів, це найбільші університети в місті (ПУСКУ, ПНПУ та ПНТУ) та гуртожитки Педагогічного університету. З'єднання має містити щонайменше по 2 канали CWDM (через кожний з яких можна підвести канал інтернет до 20 Гбіт/с). Під'єднання до інших закладів буде відбуватися по можливості та наявності вільних жил оптичного волокна.

Проект модернізації повинен бути максимально простим, достатньо економічним та використати мінімум необхідного обладнання, виключаючи пасивні пристрої (розгалужувачі), які ускладнюють топологію та вносять додаткове загасання. Тобто нова мережа буде використати вже прокладене оптичне волокно. Єдині можливі зміни, яких може зазнати існуючий тракт, це переварювання жил волокна у муфтах, при виникненні великої необхідності.

Однією з вимог проведення модернізації є забезпечення неперервності сервісу. Тобто, ми не маємо можливості розібрати існуючий канал, а потім підключити нове обладнання. У випадку несправності нової мережі, клієнт не повинен залишитися без

сервісу на довгий час. Потрібно спланувати роботи таким чином, щоб використовуючи незадіяні жили, фактично побудувати паралельну мережу, і лише потім відключати діючу.

Головним орієнтиром до створення нової топології, була обрана «подвійна зірка». Таке рішення утворює більш стабільну мережу з додатковим резервуванням на випадок відмов, та кращою фільтрацією паразитного трафіку.

Тому першим питанням постає – розміщення двох нових вузлових комутаторів у місті. Аналіз топології та перебирання різних варіантів призвели до наступного рішення – для ефективного використання оптичного волокна, розмістити перший вузол у ПУСКУ поруч із діючим, а другий – у ПНПУ.

Еталонна модель такого рішення у м. Полтава повинна виглядати наступним чином (рис. 4.2.):

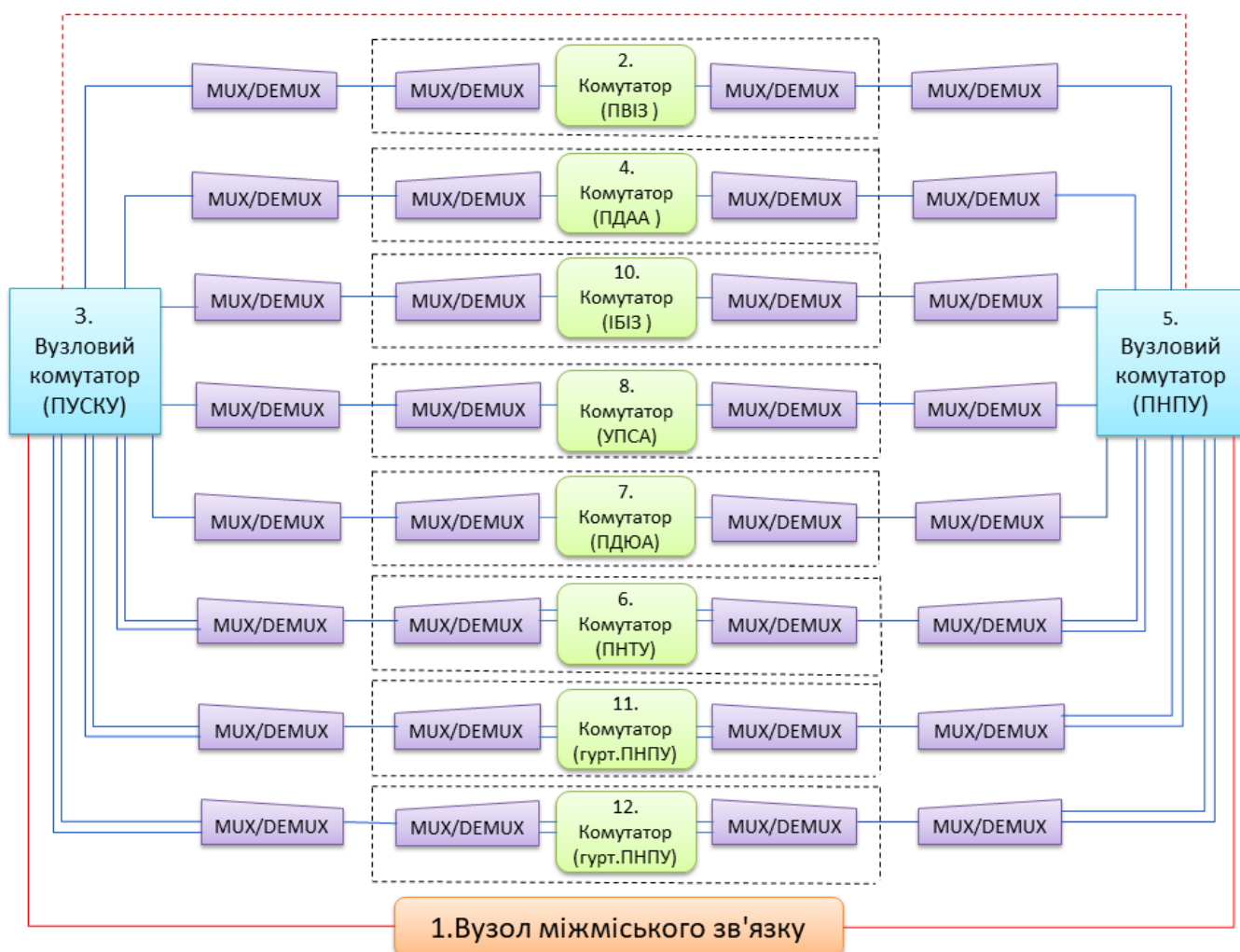


Рис. 4.2. Ідеальна модель мережі «УРАН» у місті Полтава.

Кожен клієнт одночасно під'єднаний до двох вузлів, а також вузлові комутатори з'єднані між собою на резервному максимально широкому каналі та використовують протокол STP. Основним завданням STP є приведення мережі з множинними зв'язками до деревоподібної топології, що виключає цикли пакетів. Відбувається це шляхом автоматичного блокування непотрібних в даний момент, для повної зв'язності, портів. При втраті з'єднання з однією із точок мережі, комутатор розблоковує порти, що не використовуються, для пошуку обхідного шляху доставки пакетів даних до адресата. Тим самим тимчасово змінюючи активну топологію.

Кожна лінія передачі має мультиплексор/демультиплексор на обох кінцях, для поєднання декількох оптичних сигналів в одній жилі волокна.

Подальша розробка нової топології залежить від обраного обладнання та його особливостей.

4.2. Обладнання для реалізації CWDM лінії зв'язку.

Мережа з використанням CWDM рішень потребує особливого вибору обладнання:

- 1) Оптичні мультиплексори/демультиплексори, є кістяком технології спектрального ущільнення.
- 2) SFP+ трансивери. Модулі, що перетворюють електричний сигнал на оптичний на обраній довжині хвилі. Швидкість передачі даних у подібного трансиверу досягає 10 Гбіт/с.
- 3) Комутатори вищого рівня (вузлові), їх задача – глобальна маршрутизація трафіку між абонентами.
- 4) Комутаційні кабелі (патч-корди, пігтейли). Використовуються для об'єднання окремого оптичного волокна з іншим, за допомогою спеціальних роз'ємів, або підключення приладів між собою.

Так як зона нашої відповідальності обмежується оптичними засобами, вибір комутатора доступу залишається за клієнтом. Тобто наша компетенція закінчується на роз'ємі оптичного кабелю, що надходить до місця розміщення абонента. Ми можемо надати рекомендації щодо пристроїв для отримання оптичного сигналу та його обробки в подальшому, вказати які мультиплексори/демультиплексори та SFP+ передають сигнал, на якій довжині хвилі.

Додатково, слід звернути увагу на те, що в основі лінії зв'язку в Полтаві використовується одномодове оптичне волокно з водяним піком. Це означає, що нам краще уникати використання пристроїв з довжиною хвилі у діапазоні від 1400 нм до 1500 нм для того, щоб не зіткнутися з великим загасанням сигналу [13].

4.2.1. Двохволоконний оптичний мультиплексор/демультиплексор.

Перш за все, необхідно визначитися з основою CWDM – оптичним мультиплексором/демультиплексором.

Ознайомившись з рядом рекомендацій та доступними на ринку моделями, було визначено, що для коректного комбінування елементів у системі CWDM, необхідно використати двохволоконний MUX/DEMUX.

Такий вибір значно збільшує вимоги до кількості вільних оптичних жил, що в подальшому приведе до часткового обмеження підключення деяких закладів та часткової реалізації запланованої топології.

Наш вибір зупинився на 4 Channels 1510-1570nm Dual Fiber CWDM Mux Demux, модель розробки компанії FS.COM (рис. 4.3).



Рис.4.3. Чотирьохканальний двохволоконний CWDM MUX/DEMUX з діапазоном хвиль 1510-1570 нм, розробки FS.COM [14].

Дана модель підтримує довжини хвиль від 1510 нм до 1570 нм з кроком 20 нм. Це гнучке «plug-and-play» мережеве рішення для швидкого підключення та початку роботи, дозволяє операторам заощадити на реалізації WDM-з'єднань типу «точка-точка» або «кільце».

Головні особливості:

- 1) Мультиплексування до 4 каналів у одній волоконно-оптичній парі.
- 2) Низьке внесене загасання.
- 3) Низькопрофільний модульний дизайн.
- 4) Дуплексні LC/UPC, підтримує дуплексні патч-корди для підключення до трансиверу.
- 5) Стандартний чотирьохканальний CWDM діапазон 1510 нм – 1570 нм з кроком 20 нм.
- 6) Базується на технології тонких плівок.
- 7) Пасивний прилад, не потребує електричного живлення.

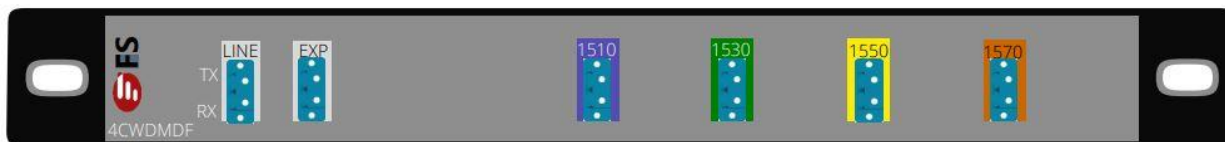


Рис. 4.4. CWDM MUX/DEMUX вид з переду.

Роз'єми, розташовані на передній панелі модулів CWDM MUX/DEMUX, позначені та мають той самий колір, який використовується для позначення довжини хвилі окремих CWDM трансиверів. Роз'єми на трансиверах позначені аналогічно, що спрощує процес підключення до відповідного порту пристрою [14].

Таблиця 4.1. Технічні характеристики чотирьохканального MUX/DEMUX [14].

Параметр	Од. вим.	Значення
Центральна довжина хвилі	нм	1510, 1530, 1550, 1570
Крок між каналами	нм	20
Пропускна смуга каналу	нм	± 6.5
Внесене загасання	дБ	≤ 2.2
Порт клієнту	—	Дуплекс LC/UPC
Технологія	—	TFF (Thin Film Filter)
Зворотні втрати	дБ	≥ 45
Робоча температура	$^{\circ}\text{C}$	$-5 \sim +75$

4.2.2. SFP+ трансивери.

Після того як наш вибір зупинився на двохволоконних MUX/DEMUX, постало питання зменшення варіативності підключень клієнтів, по причині недостатньої кількості вільних жил волокна. Тому деякі з абонентів матимуть підключення лише

до одного вузла. З метою реалізувати плани щодо встановлення максимально широкого каналу передачі з найбільшими закладами, виникає необхідність використати усі чотири канали передачі у MUX/DEMUX для підведення лінії зв'язку до 40 Гбіт/с з однієї сторони.

Для цього нам знадобляться 4 SFP+ трансивера, що транслюють сигнал на обраних несучих довжинах хвилі з діапазону MUX/DEMUX вказаного вище, а саме 1510 нм, 1530 нм, 1550 нм, 1570 нм. Чотирьохканальний мультиплексор/демультиплексор, який є основою нашої системи, має широкий ряд рекомендацій серед сумісних з ним модулів. Dell Force10 CWDM-SFP10G (рис. 4.5) зацікавив нас великим вибором доступних довжин хвилі, починаючи з 1350 нм та зупиняючись на 1610 нм.



Рис. 4.5. Зовнішній вигляд Dell Force10 CWDM-SFP10G [15].

Оптичний пристрій серії CWDM-SFP10G-20L призначений для застосування у волоконно-оптичних комунікаціях, таких як 10G Ethernet. Цей модуль використовується для одномодового волокна і працює на номінальній довжині хвилі з сітки CWDM. Доступні чотирнадцять центральних довжин хвиль від 1350 до 1610 нм з кроком 20 нм. Модуль оснащений роз'ємом SFP+, щоб забезпечити можливість швидкого підключення (hot plug). Приймач даного пристрою може отримувати та

обробляти будь-який оптичний сигнал з діапазону 1260-1620 нм. Це значить, що функція по виділенню окремої довжини хвилі знаходиться на стороні демультиплексора, а ресивер SFP+ модуля приймає та конвертує будь-який сигнал з вказаного проміжку, що потрапив на його порт.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики обраних Dell Force10 CWDM-SFP10G-20L [15].

Параметр	Од. вим.	Значення
Формфактор	—	SFP+
Центральна довжина хвилі	нм	1510, 1530, 1550, 1570
Пропускна смуга каналу	нм	-6...+7.5
Діапазон приймача	нм	1260-1620
Інтерфейс	—	LC дуплекс
Максимальна швидкість передачі	Гбіт/с	10
Потужність передатчика	дБм	-6~0
Чутливість приймача	дБм	<-14.4
Робоча температура	°C	0~70

4.2.3. Вузлові комутатори.

Комутатори вищого рівня відповідають за маршрутизацію трафіку в мережі. Наша вимога до них – достатня кількість слотів для підключення SFP+ модулів. За попередніми розрахунками, для реалізації еталонної моделі мережі, що представлена вище, нам знадобиться по 19 трансиверів зі сторони кожного вузла, необхідно орієнтуватися саме на це число при виборі.

Високошвидкісний комутатор S5850-32S2Q (32*10GE+2*40GE) розробки FS.COM (рис. 4.6) відповідає вказаним потребам.



Рис 4.6. Зовнішній вигляд S5850-32S2Q [16].

S5850-32S2Q високошвидкісні комутатори, що задовольняють вимоги міських мереж (англ. Metropolitan Area Network, MAN). Він має 32-портовий 10GbE SFP+ і 4-портовий 40GbE QSFP+ в компактному форм-факторі. S5850-32S2Q поставляється з повним системним програмним забезпеченням, з комплексними протоколами і додатками для прискорення розгортання та управління службами для традиційних L2/L3 мереж (2/3 рівня). Комутатор є економічно ефективною Ethernet платформою доступу та агрегації до ЦОД (центр обробки даних) та ідеально підходить для високих робочих навантажень.

Таблиця 4.3. Технічні характеристики S5850-32S2Q (32*10GE+2*40GE) [16].

Параметр	Од. вим.	Значення
Клас комутатору	—	L2/3, ЦОД, Metro
Порти 10GbE SFP+	шт	32
Порти 40GbE QSF+	шт	4
Буферна пам'ять	Мб	9
Non-blocking пропускна здатність	Гбіт/с	400
Комутаційна здатність	Гбіт/с	800
Затримка	нс	612
Типова споживана потужність	Вт	120
Максимальна споживана потужність	Вт	150

4.2.4. Рекомендовані комутатори рівня доступу.

Комутатори L2, що встановлюються безпосередньо у місці розміщення клієнта, не входять у зону нашої відповідальності. Тому з нашої сторони ми можемо лише надати рекомендації, характеристики сигналів та обладнання, що їх передає.

Як приклад ми обрали багатопортовий S3800-48T4S (48*10/100/1000Base-T+4*10GE SFP+) розробки FS.COM (рис. 4.7). Дана модель є найкращим рішенням для встановлення у гуртожитку, де присутня велика кількість окремих абонентів. Також в ньому присутні чотири 10GE SFP+ порти для отримання оптичного сигналу з пропускною здатністю до 40 Гбіт/с.



Рис. 4.7. Зовнішній вигляд S3800-48T4S [17].

Високошвидкісний Metro Ethernet комутатор S3800-48T4S розроблений для задоволення вимог економічно ефективного доступу або агрегації для корпоративних мереж та клієнтів мережевих операторів. Він має високопродуктивний процесор з низькими вимогами до живлення, щоб забезпечити високу швидкість маршрутизації.

S3800-48T4S підтримує кілька режимів конфігурації, що полегшує управління мережею та технічне обслуговування. Він пропонує гнучку комбінацію портів, щоб спростити користування, для безпосереднього підключення до високошвидкісного серверу зберігання даних або розгортання високошвидкісної лінії зв'язку до іншого комутатора.

Таблиця 4.4. Технічні характеристики S3800-48T4S [17].

Параметр	Од. вим.	Значення
Клас комутатору	—	L2+
Порти 10/100/1000Base-T	шт	48
Порти 10GE SFP+	шт	4
Флеш пам'ять	Мб	16
Комутаційна здатність	Гбіт/с	176
Типова споживана потужність	Вт	≤ 25
Максимальна споживана потужність	Вт	≤ 60

4.3. Розробка топології мережі «УРАН» у м. Полтава із застосуванням CWDM.

Визначившись з усім необхідним обладнанням, перед нами постало питання розміщення нової мережі при використанні двох жил оптичного волокна між точками підключення. Даний факт істотно зменшує кількість можливих з'єднань та ускладнює під'єднання деяких закладів, без перебудови мережі і прокладки нового оптичного волокна. Тому в даній розробці було прийняте рішення, першочергово під'єднати активних на даний момент та найбільших клієнтів: ПУСКУ, ПНПУ, ПНТУ та гуртожитки ПНПУ, а інших – за наявності вільних жил.

Використання двох вузлів, в поточному стані справ, не дає нам змоги в повному обсязі реалізувати усі переваги топології «подвійна зірка», однак, з іншої сторони, забезпечує підключення абонентів в місцях, де це було б фізично неможливо при наявності одного вузла.

Оцінивши декілька різних варіантів розміщення мережі, нами була визначена найоптимальніша модель волоконно-оптичної лінії зв'язку із застосуванням CWDM (рис. 4.8.):

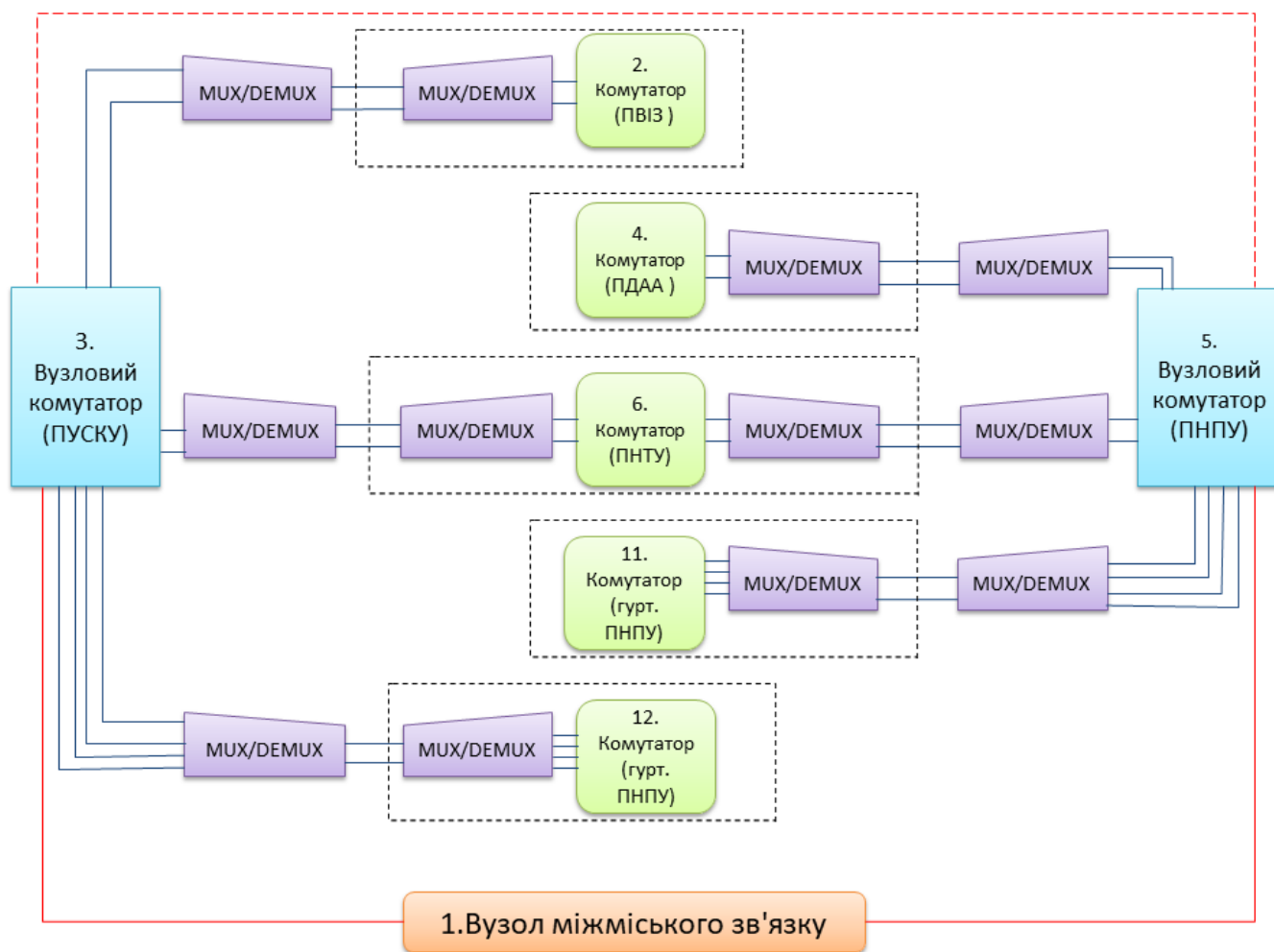


Рис. 4.8. Модель лінії зв'язку із застосуванням CWDM в сегменті мережі «УРАН» в м. Полтава.

Кожна лінія між MUX/DEMUX та комутатором відображає кількість оптичних каналів (по 10 Гбіт/с кожен), а також зображено підключення між мультиплексорами/демультиплексорами по двох жилах волокна.

Як можливо зрозуміти з рисунку, вказані клієнти підключені на максимально необхідній швидкості, як від двох вузлів, так і від одного. Підведення каналу лише з однієї сторони та зменшена кількість зв'язків між точками підключення, пояснюється недостатньою кількістю вільних жил оптичного волокна. На прикладі гуртожитків, замість встановлення двох ліній передачі по 20 Гбіт/с, на стороні одного вузла будуть встановлені одразу чотири SFP+ модулі, утворюючи 40 Гбіт/с з одного боку, які будуть використати усі чотири канали MUX/DEMUX (1510 нм, 1530 нм, 1550 нм,

1570 нм). Інші, де підключення від одного вузлового комутатора – до 20 Гбіт/с, матимуть по два модулі з кроком 40 нм (1530 нм, 1570 нм).

Першим етапом розробки нової топології є пошук оптимального шляху для організації лінії передачі між новим вузловим комутатором у ПНПУ та вузлом міжміського зв'язку, а також підключення всіх клієнтів паралельно існуючій мережі.

Отже, топологія першого етапу матиме наступний вигляд (рис 4.9):

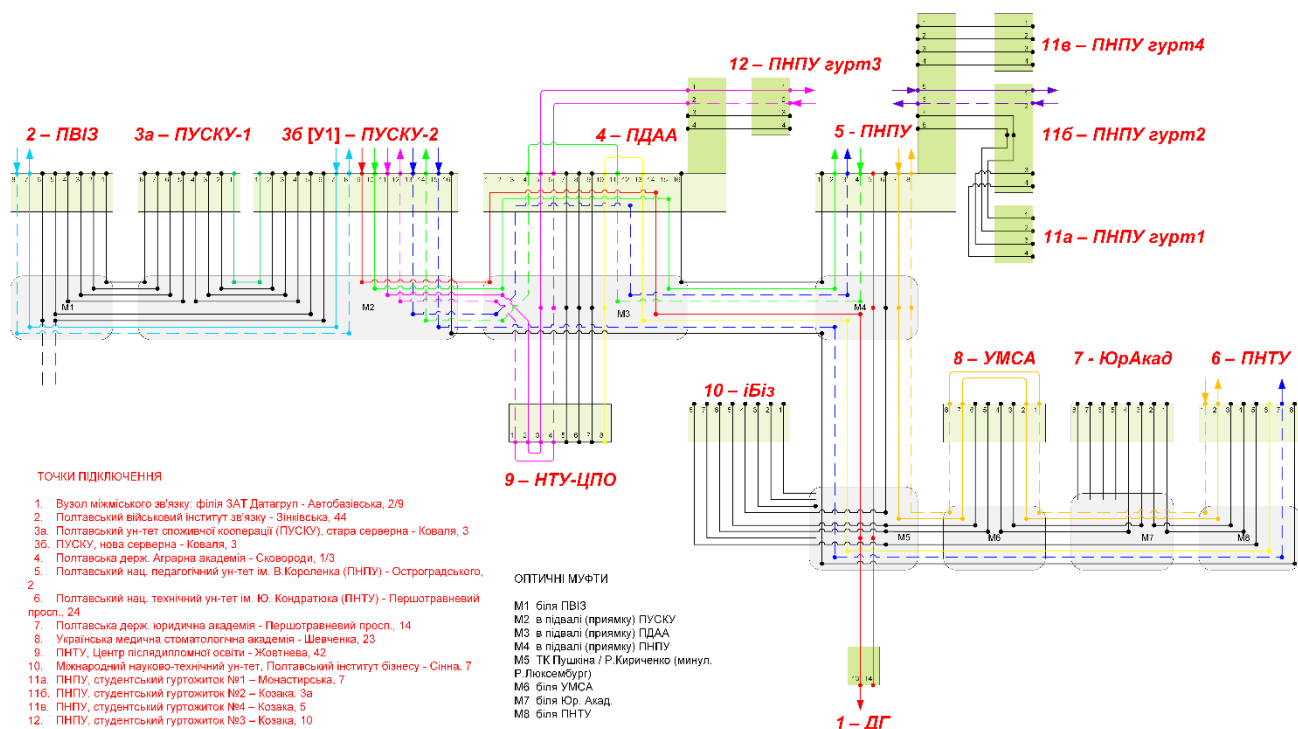


Рис. 4.9. Топологія із застосуванням CWDM у мережі «УРАН» в м. Полтава (розміщена паралельно з існуючою мережею).

Для організації зв'язку між ПНПУ та міжміським вузлом, було вирішено виконати зварювання оптичних жил у муфті M5, для того, щоб отримати пряму лінію передачі, скоротити відстань між точками підключення та організувати додаткове волокно між ПНТУ та іБіз.

Зварювання оптичних волокон, на сьогоднішній день, найбільш досконала технологія постійного з'єднання волокон. Сучасний апарат для зварювання оптичних волокон дозволяє отримати дуже низькі втрати на зварному з'єднанні – 0,01-0,02 дБ.

Цей спосіб широко використовується для постійного з'єднання багатомодового або одномодового волокна різних типів.

Також в місцях, де присутня необхідність з'єднати два кінці окремих жил, використовуються оптичні патч-корди (пігтейли) (рис 4.10).



Рис. 4.10. Одномодовий симплексний оптичний патч-корд.

Пігтейл являє собою відрізок кабелю, на кінці якого знаходиться конектор певного типу. З'єднання оптичного пігтейлу з волокном кабелю здійснюється за допомогою зварювання або механічних нероз'ємних з'єднань. Внесене загасання такого рішення зазвичай не перевищує 0.3 дБ.

На вказаній топології, канали попередньої мережі відмічені синім кольором. Підключення нового вузлового комутатору, який знаходиться поруч з зараз активним у ПУСКУ, відбуватиметься простим перемиканням оптичного кабелю. Звичайно такий метод призупинить постачання сервісу на недовгий час, але в разі несправності нової мережі, ми матимемо можливість миттєво повернутися до попередньої та продовжити налаштування.

Після завершення тестувань та введення нової лінії зв'язку у постійну експлуатацію, з'явиться можливість задіяти жили, які були зайняті попередньою

мережею. На цьому етапі маємо можливість представити остаточний варіант топології волоконно-оптичної лінії зв'язку із застосуванням CWDM у м. Полтава (рис. 4.11.).

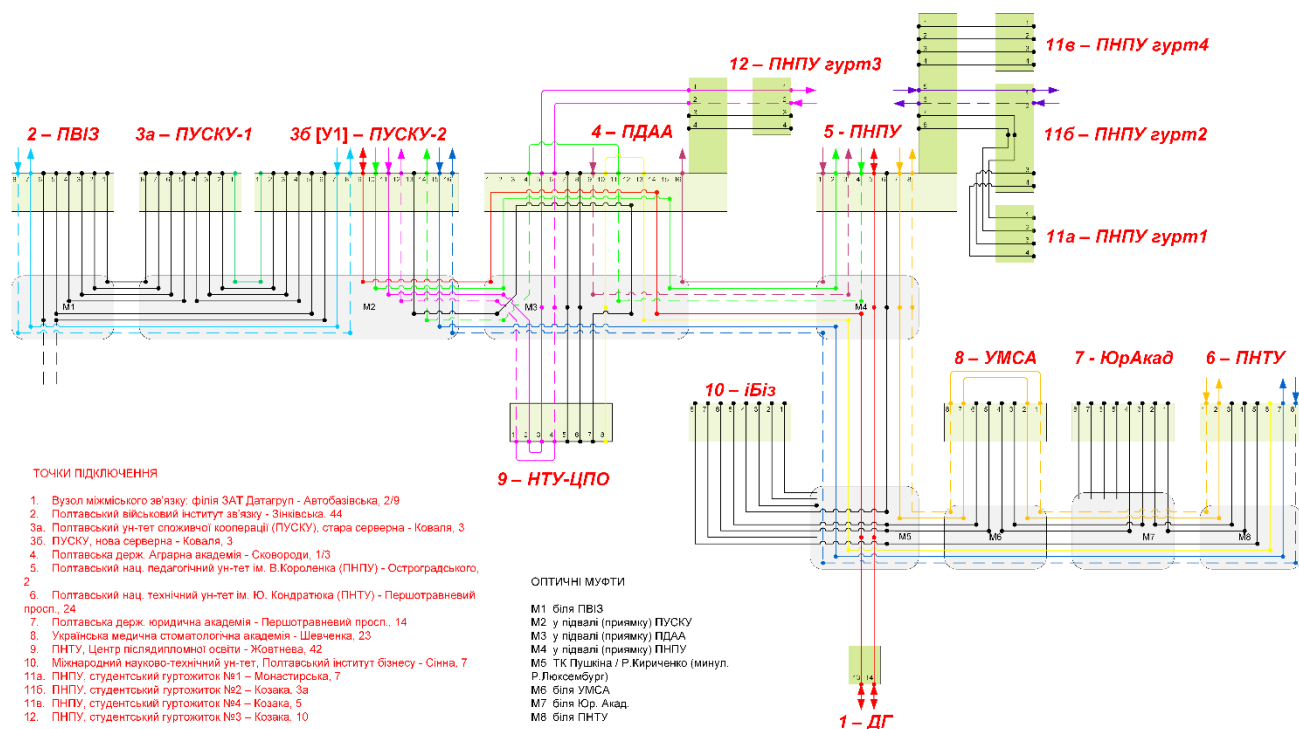


Рис. 4.11. Топологія нової мережі «УРАН» із застосуванням CWDM у м. Полтава.

Звільнення двох жил оптичного волокна дає нам можливість організувати пару додаткових підключень. По перше, це пряме з'єднання між вузлом у ПУСКУ та ПНТУ, що дозволяє нам під'єднати найбільшого клієнта до двох вузлів одночасно на швидкості до 20 Гбіт/с з кожної сторони. По друге, це підключення ПДАА до вузлу в ПНПУ. Жилу, що звільнилася між ПУСКУ та ПНПУ, зварюємо з однією із жил між ПДАА та НТУ-ЦПО у муфті М3. Отримуємо другу пряму лінію на шляху між Аграрною академією та Педагогічним університетом.

Додатково слід звернути увагу на те, що НТУ-ЦПО являється частиною ПНТУ, тому рішення о наявності та типі його підключення залишається за Технічним університетом. В межах нашої відповідальності – виділення оптичного волокна для з'єднання між ними, а саме жили №6 в ПНТУ.

Аналогічна ситуація з ПУСКУ-1 (3а на рисунку 4.11). Для його підключення залишаємо жилу №1 у ПУСКУ-2, саме тут знаходиться перший вузловий комутатор.

Гуртожитки № 1, 2 та 4 ПНПУ, мають власну внутрішню мережу, тому головний оптичний канал надходить у гуртожиток №2 (11б, рис. 4.11) та з нього розподіляється до №1 та №4.

В даній розробці нам вдалося організувати CWDM мережу, приєднавши до неї поточних клієнтів з максимальною необхідною пропускною здатністю. Також до нової лінії зв'язку були долучені два додаткові заклади: ПВІЗ та ПДАА.

При прокладанні оптичного тракту в місті Полтава, використовувався саме шістнадцятижильний кабель, вісім жил з якого знаходяться у власності «УРАН», саме їх ми використали у нашій роботі, інші вісім – організації, що займалась прокладанням волокна. Достатньо довгий час ці жили знаходяться в продажу, що дає нам додаткові варіанти для підключення інших закладів або налаштування нових з'єднань при виникненні такої необхідності.

Простота у налаштуванні та модульність CWDM пристроїв дає змогу швидко та без зайвих труднощів змінювати топологію мережі за допомогою перестановки обладнання. Велика кількість слотів SFP+ у вузлових комутаторах забезпечує великий запас потужності для подальшого розвитку.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ОСНОВІ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

5.1. Опис ідеї проекту.

Мета проекту: Створити проект модернізації мережі УРАН в м. Полтава, на базі існуючої одножильної ВОЛЗ.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Модернізація існуючої оптичної лінії зв'язку із застосуванням технології CWDM м. Полтава	1. Міські та регіональні оптичні мережі	Просте та економічно вигідне рішення проблеми виснаження волокон. По існуючому оптичному волокну може проводитися додаткове обслуговування без переривання обслуговування вже наявних абонентів.
	2. Збільшення пропускної здатності існуючих мереж на базі ВОЛЗ	Рішення грубого спектрального ущільнення незалежні до різних протоколах передачі інформації. Це дозволяє створювати різні телекомунікаційні послуги в одній транспортному середовищі
	3. Створення до 8 логічних пар волокон (каналів), використовуючи різні довжини хвиль, по одному волокну	Прозорість для протоколів від 100 Мбіт/с до 40 Гбіт/с Будь-яка комбінація сервісів по одному і тому ж кабелю

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Економічні	19000 у.о.	18775 у.о.	20000 у.о.		+	
2.	Призначення	Підвищення пропускної здатності	Підвищення пропускної здатності	Підвищення пропускної здатності		+	
3.	Надійності	Довговічність: 15 років	Довговічність: 15 років	Довговічність: 15 років		+	
4.	Технологічні	Модернізація існуючої оптичної лінії зв'язку	Модернізація існуючої оптичної лінії зв'язку	Модернізація існуючої оптичної лінії зв'язку		+	
5.	Ергономічні	-	-	-		+	
6.	Органолептичні	-	-	-		+	
7.	Естетичні	-	-	-		+	
8.	Транспортабельності	-	-	-		+	
9.	Екологічності	Екологічно	Екологічно	Екологічно		+	
10	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту.

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Модернізація існуючої оптичної лінії зв'язку мережі «Уран» в м. Полтава	Технологія 1 CWDM- Coarse WDM по 4 канали туди/назад, на частотах з інтервалами 20 нм	В наявності	Доступна
	Технологія 2 DWDM- Dense WDM - до 40 або 100 каналів туди/назад, рознесених на 0.8 нм, використовується на магістральних міжміських каналах.	В наявності	Доступна але значно дорожче за CWDM, в місті, зазвичай, не потрібна.
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Системи передачі CWDM			

Технологія CWDM продовжує час «життя» існуючих волоконно-оптичних мереж шляхом застосування сітки частот, що не використовуються традиційними приємо-передатчиками.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	до 30,0 тис. у.о
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Ринок зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Наявність дозвільної документації
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	150

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Інтеграція ВНЗ, в загальноєвропейський науковий простір.	Заклади науки, освіти та культури.	Поведінку клієнта формує ринок.	1) до продукції: швидкість передачі даних 100-1000 Мбіт/с. Швидкість передачі на міських сегментах не обмежується, а послуги з передачі даних не тарифікуються. 2) до компанії- постачальника: безперебійне постачання послуги без зниження швидкості.

Таблиця 5.6. Фактори загроз.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність висококваліфікованих кадрів	Технологія є наукоємною тому потребує висококваліфікованого персоналу	Пошук персоналу у наукових інститутах та профільних організаціях
2.	Потреба в матеріально-технічних ресурсах	Матеріально - технічне забезпечення та умови для тестування працездатності продукту	Пошук необхідних матеріально-технічних ресурсів

Таблиця 5.7. Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Освоєння нових ринків або збільшення частки ринку; скорочення часу, для випуску інновацій; підвищення гнучкості; зменшення витрат праці на одиницю продукції; зменшення матеріальних витрат.	Покращення характеристик технології та обслуговування
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає - більшість клієнтів зацікавлені у покращенні технології	Покращення характеристик технології та обслуговування, реклама

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції – олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, існує фірма – лідер яка займає значну частку ринку	Підвищувати якість обслуговування за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Місцезнаходження фірм обмежується територіально в межах країни;	Маркетингові просування свого проекту
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Економічна боротьба в одній галузі економіки, пропонуються технології, що задовольняють одну потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Регулярні дослідження за продуктами конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Конкуренція між близькими одна до одної технології	Покращувати якість обслуговування
5. За характером конкурентних переваг – цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Продавати послуги за принципом: ціна-якість.
6. За інтенсивністю – немарочна	Роль торгової марки незначна	Реклама технології

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Optinet», «Triolan»	Немає	Продається безпосередньо розробниками	Вимоги до якості	Замінників немає
Висновки:	Конкуренти вже давно на ринку	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Обслуговування має бути якісним та дешевим	Обмежень немає

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Покращення характеристик швидкості та безперебійності.	Конкуренти не мають даного фактору, що має велике значення для модернізації системи.
2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності модернізації	Модернізація має видавати стабільно високу швидкість інтернету.
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості впровадження необхідної модернізації - фінансові та наукові ресурси
4.	Економічний (ціна модернізації)	Ціна модернізації не має бути занадто висока.

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту.

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь покращення характеристик системи після модернізації.	20						+	
2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності	14						+	
3.	Наявність наукових ресурсів	17				+			
4.	Економічний (вартість модернізації)	15			+				

Таблиця 5.12. SWOT-аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: Покращення характеристик системи після модернізації.	Слабкі сторони: Економічний (вартість модернізації)
Можливості: Більша швидкість та стабільність інтернету.	Загрози: Збільшення собівартості модернізації за рахунок збільшення вартості ресурсів і компонентів

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, пошук інвесторів, пошук наукових та технічних ресурсів, налагодження системи, вихід на ринок	80 %	2 роки
2.	Пошук інвесторів, пошук наукових та технічних ресурсів, налагодження системи налаштування, вихід на ринок	60%	3 роки

Обрано альтернативу ринкової поведінки № 1.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Заклади науки, освіти та культури.	Готові	Високий	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку.

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	4	В якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів.	Турбота про розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Стратегія заняття конкурентної ніші

Обрано стратегію заняття конкурентної ніші.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Показники швидкості та стабільності	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування.

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока швидкість, стабільність довговічність	Стратегія заняття конкурентної ніші	Ступінь покращення характеристик інтернету.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване обслуговування, співпраця.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар\технологія	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Покращення характеристик інтернету	Збільшення швидкості, стабільності роботи	Збільшення швидкості, стабільності роботи
2	Надійність	Довготривале використання	Стабільність процесу

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару.

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Модернізація волоконно-оптичної лінії зв'язку із застосуванням технології CWDM
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1. Підвищення швидкості
	2. Дискретна ціна користування 2100-2400 грн\міс
	3. Висока стабільність.
	4. Довговічність.
	Якість: довговічність 15 років,
III. Товар із підкріпленням	Пакування: -
	Марка: "-"
	До продажу: гарантія.
	Після продажу: обслуговування.
За рахунок чого потенційний технологію буде захищено від копіювання: патент	

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни.

№ п/п	Рівень цін на замітники	Рівень цін на аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на послугу
	-	-	-	2100-2400 грн

Таблиця 5.21. Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Заказ товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування	Канал нульового рівня	Розробник збуває технологію користувачам

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Потреба споживачів в високошвидкісному інтернеті	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Низька ціна на збільшення швидкості та стабільності.	Поширення знань про підприємство, поширення відомостей про сервіс, безумовного виконання взятих на себе зобов'язань.	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликано впливати на споживчі переваги захоплення і альтруїзм.

Технологія CWDM забезпечує гнучкість системи передачі інформації і можливість реалізації різних видів топології.

Ринкова комерціалізація даної технології є досить високою через значну ціну в конкурентів та присутність конкурентних характеристик. Також, ринок розвивається достатньо швидко, що підвищить шанси залучити саме систему CWDM, яка може вирішити проблеми нестачі пропускної здатності при збільшенні економічної ефективності використання мережі та мінімізації капітальних витрат на її побудову.

ВИСНОВКИ

З кожним днем вимоги до пропускної здатності мережі безупинно ростуть. Кількість споживаного трафіку та розміри даних, що передаються, утворюють необхідність у подальшому розвиненні ліній зв'язку.

Нами була розроблена модернізована топологія мережі сегменту «УРАН» у місті Полтава, що базується на використанні технології CWDM. Таке рішення дозволяє істотно збільшити пропускну здатність лінії передачі, без додаткового прокладання оптичного волокна. Використовуючи прокладений восьмижильний оптичний кабель, нам вдалося розробити нову топологію лінії зв'язку з підключенням до найбільших абонентів, забезпечивши підведення щонайменше по 2 канали CWDM (10 Гбіт/с кожний) по одній оптичній жилі. Початковий запуск лінії зв'язку буде використати вільне волокно, тобто система буде встановлена паралельно існуючій, для налагодження та тестування без переривання надання сервісу поточним абонентам.

Нова топологія є основою для подальшого розвитку мережі та просування у бік утворення «подвійної зірки». Обране обладнання має великий запас потужності та варіативності для майбутнього підключення нових клієнтів. Застосування CWDM рішень значно спрощує внесення змін у лінію зв'язку завдяки модульності та легкому процесу встановлення компонентів.

Запропонована волоконно-оптична лінія зв'язку із застосуванням грубого спектрального ущільнення в м. Полтава є ефективним рішенням актуальних на даний момент питань, таких як виснаження волокна та нестача пропускної здатності в умовах міської мережі. До її переваг також можливо віднести простоту в реалізації та достатню надійність в процесі експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ВОЛС: волоконно-оптичні лінії зв'язи [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.tls-group.ru/services/sistemy-tsod/struktur-kab-sistem/vols/>.
2. ВОЛС. Основні характеристики і сфери застосування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://pue8.ru/kabelnye-linii/548-vols-osnovnye-kharakteristiki-i-sfery-primeneniya.html>. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛС ВМЕСТО КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ РАСШИРЯЕТ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://roks.com.ua/DyWP/bindata/i3583/primenenie_vols_vmesto_koaksialnih_kabeley_.pdf.
3. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛС ВМЕСТО КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ РАСШИРЯЕТ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://roks.com.ua/DyWP/bindata/i3583/primenenie_vols_vmesto_koaksialnih_kabeley_.pdf.
4. Етапи розвитку ВОЛС [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://kunegin.com/ref7/fiber/vols1_2.htm.
5. WDM — технологія ущільнення оптичних каналів. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://shop.nag.ru/catalog/article/id/4/catalog_id/43.
6. Технологія CWDM та її переваги [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.omnilink.com.ua/ukr/articles/cwdm_tech.
7. Технологія CWDM. Історія і причини появи [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.prointech.ru/kb/uplotnenie-vols/cwdm-tehnologiya.html>.

8. Будова мультиплексорів/демультиплексорів CWDM, їх різновиди [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.omnilink.com.ua/ukr/articles/cwdm_mat4ast3.
9. Рівень доступу: топології і обладнання [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.omnilink.com.ua/ukr/articles/etth-net>.
10. Асоціація УРАН [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.
11. Мережа УРАН Загальні відомості [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.
12. Мережа УРАН. Полтава. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.
13. Одномодові оптичні кабелі і волокна на мережах зв'язку [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/item/odnomodovi-opticheskie-kabeli-i-volokna-na-setjah-svjazi.html>
14. DATASHEET. 4 Channels 1510-1570nm Dual Fiber CWDM Mux Demux W/Expansion Port, FMU Plug-in Module, LC/UPC. [Електронний ресурс] // FS.COM. Data Center & Cloud Computing. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fs.com/file/datasheet/4ch-cwdm-mux-demux-1510-1570-with-exp.pdf>.
15. Datasheet. 10G CWDM SFP+ 1350nm~1610nm 20km Transceiver for SMF. [Електронний ресурс] // FS.COM. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fs.com/file/datasheet/cwdm-sfp-plus-1350nm-1610nm-20km-transceiver-datasheet.pdf>.
16. DATASHEET. S5850 Series Switches. 10GbE ToR/Leaf Ethernet Switches for Data Center. [Електронний ресурс] // FS.COM. Data Center & Cloud Computing.. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fs.com/file/datasheet/s5850-32s2q-10ge-and-40ge-ethernet-switch-datasheet.pdf>.
17. DATASHEET. S3800 Series Ethernet Switches 1GE Access and 10G Uplink Network Switches. [Електронний ресурс] // FS.COM. Data Center & Cloud Computing.. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fs.com/file/datasheet/s3800-series-1ge-access-and-10ge-uplink-network-switches-datasheet.pdf>.